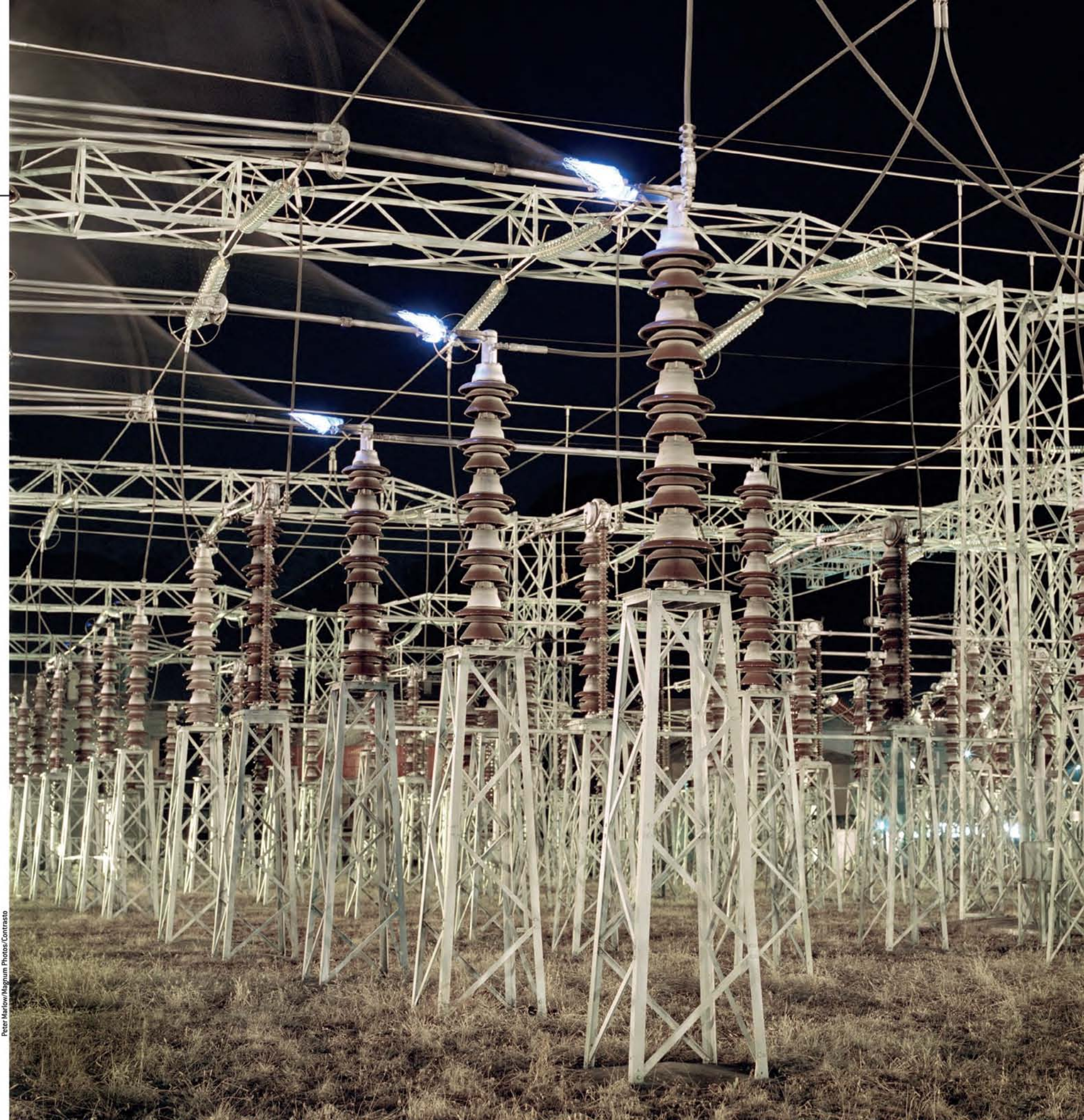
Energia: quale futuro?

Le riserve di petrolio si assottigliano, il prezzo aumenta, cresce la domanda di energia: e l'Italia si fa luce con il nucleare degli altri

di Ugo Spezia

Il sistema energetico italiano versa ormai da decenni in condizioni critiche, sotto l'influsso di spinte inerziali che scontano negli ultimi anni anche le contraddizioni di un mercato tutt'altro che compiuto. Il bilancio energetico complessivo dell'Italia dipende dall'importazione di fonti energetiche per l'82 per cento del fabbisogno, con una spesa annua che nel 2003 ha superato i 30 miliardi di euro. Il fabbisogno nazionale è coperto per il 65 per cento attraverso il ricorso agli idrocarburi. La situazione è ancora più grave nel sistema elettrico, dove la dipendenza dall'estero raggiunge l'84 per cento e la dipendenza dagli idrocarburi il 75. La situazione è ormai tale da condizionare pesantemente la capacità dell'Italia di competere sui mercati internazionali, in quanto il costo dell'energia finisce per gravare intollerabilmente sul sistema industriale.

Peter Marlow/Magnum Photos/Contrasto

SPORCA E COSTOSA. A causa dell'impiego intensivo di petrolio nella produzione di elettricità, oltre a porre seri problemi di salvaguardia dell'ambiente oggi l'energia elettrica prodotta in Italia costa il 60 per cento in più della media europea, il doppio di quella prodotta in Francia e il triplo di quella prodotta in Svezia.

A partire dalle prime crisi del mercato del petrolio i paesi industriali hanno avviato politiche di diversificazione del mix energetico che li hanno progressivamente portati a diminuire il contributo percentuale degli idrocarburi e a incrementare quello del carbone e dell'energia nucleare. Nello stesso periodo, in seguito alla rinuncia all'energia nucleare, il contributo complessivo degli idrocarburi alla copertura del fabbisogno energetico italiano è addirittura aumentato. Per produrre energia elettrica oggi l'Italia brucia più petrolio di quello impiegato per lo stesso scopo in tutti gli altri paesi europei messi assieme.

Il sistema energetico italiano è diventato il più costoso e instabile fra quelli dei paesi industriali, con pesanti conseguenze sulla competitività delle imprese e sul bilancio delle famiglie. L'energia elettrica prodotta in Italia costa il 60 per cento in più della media europea, il doppio di quella prodotta in Francia e il triplo di quella prodotta in Svezia. L'abnorme ricorso ai combustibili fossili pone inoltre all'Italia rilevanti problemi di salvaguardia dell'ambiente e rende di fatto irraggiungibili gli obiettivi di riduzione delle emissioni previsti dal protocollo di Kyoto. Secondo le valutazioni del Ministero dell'Ambiente, attuare il Protocollo di Kyoto costerebbe all'Italia 360 dollari per abitante, contro i 5 della Germania (33 per cento nucleare) e i 3 della Francia (78 per cento nucleare).

Ian Berry/Magnum Photos/Contrasto

Il fallimento della politica energetica

I tentativi di pianificazione energetica sono falliti definitivamente alla fine degli anni ottanta, con l'accantonamento di fatto di tre piani energetici nazionali e due piani nazionali dei trasporti. L'inizio della crisi fu segnato dalla conferenza nazionale sull'energia del 1987, dopo la quale il sistema politico non fece proprie le indicazioni unanimi che venivano dal sistema tecnico-scientifico ed economico-industriale, ma quelle derivate dalle analisi ideologiche del sistema ambientalista.

DigitalVision

Nella palestra del dopo-Chernobyl si esercitarono un po' tutti. Anche autorevoli uomini di scienza giunsero a dichiarare che all'energia nucleare da fissione, tutto sommato, si poteva rinunciare tranquillamente: rappresentava una fonte marginale e dietro l'angolo c'era la fusione nucleare controllata, che avrebbe prodotto il primo chilowattora intorno al 2015. Oggi sono gli stessi ricercatori che lavorano alla fusione nell'ambito delle *joint venture* internazionali JET e ITER a dire che quell'obiettivo va spostato almeno al 2040.

In assenza dell'unica alternativa valida ai combustibili fossili, il cammino su cui si avviò la politica energetica italiana fu quello dell'incentivazione delle fonti rinnovabili: quelle classiche (idroelettricità, geotermia) e quelle nuove (solare termico, fotovoltaico, eolico, biomasse, biocombustibili, combustibile derivato dai rifiuti). Le informazioni pubblicate dal Ministero delle Attività produttive consentono di stimare in circa 99.000 miliardi di lire (51,1 miliardi di euro) l'impegno complessivo sostenuto dallo Stato nel periodo 1981-2002 per l'incentivazione delle fonti rinnovabili, prevalentemente attraverso il provvedimento CIP 6/92.

In sintesi/*Crisi annunciata*

- Unico paese al mondo, dopo Chernobyl l'Italia ha rinunciato completamente al nucleare (salvo acquistare energia nucleare dall'estero), favorendo gli investimenti nelle fonti rinnovabili.
- Oggi le rinnovabili, vecchie e nuove, a fronte di oltre 50 miliardi di euro di finanziamenti producono appena il 6,5 per cento del fabbisogno nazionale, mentre il 65 per cento dell'energia deriva dagli idrocarburi.
- La progressiva riduzione delle risorse petrolifere e il conseguente aumento del prezzo del greggio impongono di rivedere le scelte politiche degli ultimi decenni, mettendo mano a un nuovo piano energetico nazionale.

ACQUA, VENTO O SOLE? Tra il 1981 e il 2002, in Italia la spesa statale per l'incentivazione delle fonti rinnovabili è stata pari a 51,1 miliardi di euro, a fronte di una copertura del fabbisogno energetico nazionale nel 2003 del 6,5 per cento: fornita però quasi tutta da idroelettrico e geotermico.

DigitalVision

A fronte di questo impegno, le fonti rinnovabili contribuiscono (dati 2003) per il 6,5 per cento alla copertura del fabbisogno energetico complessivo dell'Italia. Ma questo contributo è dovuto in massima parte alle fonti rinnovabili classiche (idroelettrico e geotermico) e alla legna da ardere; le nuove fonti rinnovabili (solare termico, fotovoltaico, eolico, biocombustibili e CDR) hanno un ruolo marginale (0,2 per cento). In riferimento alla produzione di energia elettrica, le fonti rinnovabili hanno fornito complessivamente il 17,9 per cento, ma ancora una volta il contributo è attribuibile quasi interamente alle fonti rinnovabili classiche (15,6 per cento idroelettrico, 1,8 geotermoelettrico); le nuove fonti rinnovabili contribuiscono complessivamente per lo 0,5 per cento (dati 2003).

Se si pensa che questo contributo è costato 51,1 miliardi di euro (più del triplo della Finanziaria 2004), si tratta certamente dei chilowattora più costosi mai prodotti al mondo. E mentre si continua a gridare che lo Stato non ha fatto abbastanza, e che le nuove fonti rinnovabili sono tuttora la chiave del futuro energetico del paese, il contributo massimo ottenibile dalle nuove fonti rinnovabili nella realtà nazionale, secondo le stime contenute nel documento TERES II del programma ALTENER della Commissione Europea, nel 2020 non potrebbe coprire che il 5 per cento del fabbisogno energetico nazionale.

Le nuove fonti rinnovabili

Il mancato decollo delle nuove fonti rinnovabili è legato ai limiti fisici che le caratterizzano: la bassa densità di potenza, che vincola all'impegno di superfici molto estese e impedisce il conseguimento di significative economie di scala; i problemi di affidabilità, che comportano costosi interventi di manutenzione e di sostituzione; e la spiccata aleatorietà, che rende comunque necessaria la realizzazione di impianti convenzionali sostitutivi per i periodi di indisponibilità.

Per fare qualche esempio, una girante eolica ha un fattore di disponibilità che raramente raggiunge il 20 per cento, il che significa che funziona in media solo per un quinto delle 8760 ore di un anno; la realizzazione di un impianto di produzione di acqua calda a pannelli solari o di un impianto fotovoltaico in un edificio esistente comporta costosi interventi impiantistici e richiede comunque sistemi convenzionali sostitutivi per i periodi di indisponibilità. Nella maggior parte dei casi, i costi aggiuntivi sono destinati a non essere mai ammortizzati.

La bassa densità di potenza associata all'energia solare e all'energia eolica è tale da richiedere l'impegno di vaste aree per produrre la stessa energia di una centrale convenzionale. Mentre un impianto termoelettrico o nucleare della potenza di 1000 megawatt impegna una superficie di 10-20 ettari, un impianto fotovoltaico di pari potenza impegna un'area di 200 ettari, un impianto solare termico a concentrazione (Progetto Archimede) un'area di 2000 ettari, e un impianto eolico un'area di oltre 12.000 ettari (e sarebbero comunque necessari impianti convenzionali sostitutivi).

Le nuove fonti rinnovabili possono certamente fornire un contributo importante in un'ottica di razionalizzazione dei consumi energetici, ma sono destinate dalla termodinamica ad avere un

Il miraggio dell'idrogeno

Constatata l'inadeguatezza delle fonti rinnovabili, l'approccio ideologico al problema si va concentrando negli ultimi tempi sul miraggio dell'idrogeno, che ha sostituito quello della fusione nucleare.
Ebbene, l'idrogeno non può neanche essere considerato una fonte energetica. Dal momento che esiste in natura allo stato gassoso solo in piccola percentuale (qualche parte per milione) nella composizione dell'aria, l'idrogeno deve essere prodotto artificialmente, e si possono utilizzare tre metodi:

- per via termica dal metano ($H_2O + CH_4 + E_t \rightarrow 2H_2 + CO_2$);
- per via elettrolitica dall'acqua ($2H_2O + E_e \rightarrow 2H_2 + O_2$);
- per via radiolitica dall'acqua ($2H_2O + E \rightarrow 2H_2 + O_2$).

In tutti e tre i processi è necessario un apporto di energia esterno; il primo processo ha il grosso problema di produrre anidride carbonica, e in tutti i casi il bilancio energetico complessivo è negativo. Per produrre idrogeno per via elettrolitica serve una volta e mezza l'energia che si può poi ricavare dalla sua combustione. Al costo medio di produzione del chilowattora che si registra in Italia, un metro cubo di idrogeno elettrolitico costerebbe circa 29 centesimi di euro, ovvero il 30 per cento in più del metano, ottenendo un potere calorifico che è circa un quarto.
L'idrogeno può essere quindi considerato al più un vettore energetico, conveniente per altri motivi (impatto ambientale locale nullo in fase di combustione) solo se si riesce a produrlo a basso costo e senza produrre CO_2 e a veicolarlo risolvendo i rilevanti problemi di sicurezza che pone. Ma sembra che in Italia le leggi della termodinamica debbano essere ancora una volta rilette in chiave ideologica, dato che già si parla di coprire il paese di pannelli solari allo scopo di produrre idrogeno.

GERHARD SCHMIDT, vicepresidente del settore Research & Advanced Engineering della Ford siede in una Focus alimentata a idrogeno durante una conferenza stampa nell'aprile 2004.

AP Photo/Paul Sancya

ruolo «integrativo», non «sostitutivo», rispetto alle fonti fossili e al nucleare. Se la classe politica del 1987 avesse letto – dopo averli finanziati – i risultati dei Progetti Finalizzati Energetica del CNR, avrebbe potuto capire che dalle fonti rinnovabili non poteva che giungere un contributo limitato.

Purtroppo così non è stato, e, in assenza di una vera politica settoriale, il risultato degli assestamenti inerziali del sistema energetico italiano lo vede tuttora solidamente fondato sul petrolio e sul gas naturale di importazione.

Le riserve petrolifere

La stima delle risorse petrolifere accessibili a livello mondiale con le attuali tecnologie di estrazione è di poco più di mille miliardi di barili. Al tasso di produzione attuale (25 miliardi di barili all'anno) sembrerebbe che le risorse esistenti siano in grado di garantire gli approvvigionamenti per i prossimi 40 anni. Ma le analisi tecniche dicono che le cose potrebbero andare diversamente. Le stime delle risorse petrolifere mondiali sono affette da tre cause principali di errore per eccesso: anzitutto ai paesi produttori conviene sovrastimare le proprie riserve per avere più rilievo in sede internazionale, attrarre gli investimenti e non perdere la capacità di ottenere prestiti; inoltre, i paesi dell'OPEC hanno un interesse particolare a gonfiare le stime delle loro riserve, dal momento che ciascun paese può esportare in proporzione alle riserve stimate; infine, le compagnie petrolifere che operano sul mercato internazionale hanno interesse a sovrastimare le riserve di cui dispongono per elevare il valore del proprio pacchetto azionario e per attrarre capitali.

Sono stati due autorevoli analisti della Petroconsultants di Ginevra a mettere in guardia dalle pagine di questa rivista (si veda *La fine del petrolio a buon mercato*, di Colin J. Campbell e Jean H. Laherrère, in «Le Scienze» n. 357, maggio 1998) su questi meccanismi che, anno dopo anno, e nonostante gli elevatissimi tassi di estrazione, fanno sì che le riserve mondiali dichiarate di petrolio si mantengano costanti o addirittura aumentino.

Alla fine degli anni novanta il mondo disponeva di riserve per circa 1000 miliardi di barili, mentre la produzione cumulativa, ovvero il petrolio estratto fino ad allora da tutti i pozzi esistenti, era stimabile in oltre 850 miliardi di barili. Le risorse convenzionali oggi disponibili sono quindi dello stesso ordine di grandezza dei quantitativi di petrolio già estratti. Questo fatto ha un'importanza determinante, poiché il ciclo di produzione del petrolio è descritto dalla curva a campana di Hubbert, che raggiunge il massimo proprio quando le risorse estratte sono pari alle risorse ancora disponibili. Secondo gli analisti della Petroconsultants il massimo della curva potrebbe essere raggiunto entro il 2010, e da allora in poi il mercato sarà caratterizzato da una progressiva contrazione dell'offerta.

Gli operatori del mercato petrolifero mondiale sono ben consci della situazione: la prova è nell'andamento dei prezzi del petrolio negli ultimi anni. Cosa accadrebbe infatti ai prezzi se il mercato prendesse atto che le risorse petrolifere sono in via di esaurimento? Si avrebbero forti oscillazioni del prezzo del barile intorno a un prezzo medio progressivamente crescente. Ovvero, proprio ciò che sta iniziando ad accadere oggi.

La crescita dei prezzi potrebbe innescare un processo di autocontenimento della domanda simile a quello che ebbe luogo negli anni settanta e ottanta, e quindi un prolungamento della vita economica delle risorse, sia pure a prezzi molto elevati. Ma, dopo la razionalizzazione energetica indotta dai precedenti shock petroliferi, i margini di recupero di efficienza nei paesi industriali, a meno di cambiamenti sostanziali nello stile di vita (che avrebbero essi stessi un costo molto elevato), sono oggi molto limitati.

Occorre inoltre considerare che il fabbisogno tendenziale di petrolio è dettato, più che dai paesi industriali avanzati, dalla domanda che vanno esprimendo le vaste aree geopolitiche in via di sviluppo. La US Energy Information Administration prevede

Ap-Photo

AP Photo/GRTN

DALL'AUSTERITY AL BLACKOUT. Un gruppo di bambini in bicicletta lungo via dei Fori Imperiali a Roma il 9 dicembre 1973: era la seconda domenica dell'*austerity*, come la stampa battezzò il divieto della circolazione del traffico automobilistico privato durante i giorni festivi provocato dalla crisi energetica. Qui a fianco, la sala operativa del GRTN (Gestore della rete di trasmissione nazionale) di Roma. Durante l'estate del 2003, l'Italia raggiunse un picco record di consumi elettrici; la notte del 28 settembre, poi, il distacco di una linea collegata con la Francia provocò un blackout sull'intero territorio nazionale, che in alcune regioni si protrasse per tutto il giorno dopo.

una crescita della domanda mondiale di greggio del 60 per cento entro il 2020, quando raggiungerà 40 miliardi di barili all'anno: è difficile immaginare come possa essere soddisfatta a prezzi confrontabili con quelli attuali.

La crisi del sistema elettrico

Il 28 settembre 2003, con il blackout che ha lasciato al buio per ore l'intero paese, l'Italia ha toccato con mano la profondità della crisi in cui ormai versa il sistema elettrico nazionale. Per ridurre il costo del chilowattora, nell'ultimo decennio abbiamo coperto fra il 15 e il 18 per cento del fabbisogno energetico nazionale attraverso le importazioni di elettricità dall'estero. Si tratta di energia prodotta essenzialmente nelle centrali nucleari francesi che, stante la condizione di saturazione della capacità di trasporto degli elettrodotti che ci collegano direttamente alla Francia (per inciso, la realizzazione di nuovi elettrodotti è ostacolata dalle amministrazioni locali per il terrore dell'«elettrosmog»), deve transitare anche attraverso la Svizzera, l'Austria e la Slovenia.

I contratti di fornitura prevedono un prelievo costante di 6300 megawatt sulla rete estera: come dire che all'estero ci sono otto centrali nucleari della potenza di quella di Caorso che lavorano a pieno regime per noi, con buona pace di chi sostiene che l'Italia ha rinunciato all'energia nucleare (in realtà l'abbiamo trasformata in una nuova fonte di importazione).

Per effetto delle condizioni di fornitura (prelievo costante), di notte il prelievo sulla rete estera corrisponde al 25 per cento del fabbisogno elettrico nazionale. La notte del 28 settembre 2003 si verificò il distacco di una linea che stava erogando una potenza di 1400 megawatt, potenza che non si riuscì a ripartire sulle altre linee, già sature.

In questi casi, i regolamenti emanati dall'Autorità per l'energia elettrica e il gas stabiliscono che deve entrare in funzione la cosiddetta «riserva calda», ovvero un certo numero di centrali mantenute pronte a partire. Ma mantenere un impianto alimentato a petrolio o a gas in tali condizioni costa molto, e gli esercenti hanno pensato bene di poterne fare a meno. La conseguenza è stata il blackout. Dopo qualche giorno, quando il dibattito ha recuperato toni pacati, si sono confrontate tre diverse posizioni. Quella del Governo è centrata sulla necessità di costruire nuove centrali per rendere il sistema elettrico nazionale autosufficiente.

Secondo i tecnici, invece, l'autosufficienza basata sul petrolio e sul gas naturale ha l'effetto di elevare ulteriormente il costo medio del chilowattora, mentre occorrerebbe nel breve termine incrementare l'importazione di energia elettrica dai paesi nucleari (e quindi costruire nuovi elettrodotti) e nel medio-lungo termine costruire nuovi impianti di base (a carbone e nucleari). La posizione degli ambientalisti resta quella di sempre: la soluzione è nelle nuove fonti rinnovabili. Evidentemente vent'anni di insuccessi e oltre 50 miliardi di euro sono trascorsi invano.

L'energia nucleare

Sui mezzi d'informazione italiani si continuano a leggere frasi del seguente tenore: «Dopo Chernobyl l'energia nucleare è in via di abbandono in tutto il mondo». Naturalmente non è vero. Secondo i dati dell'ONU-IAEA, la potenza nucleare in funzione nel mondo al momento del disastro di Chernobyl era di 250.000 megawatt elettrici, mentre alla fine del 2003 era di circa 361.000: una crescita del 44,6 per cento. I reattori in esercizio nel mondo oggi sono 439, quelli in costruzione sono 31 e altri 7 sono stati ordinati: tutto è, fuorché un'uscita di scena.

Un'altra frase ricorrente è: «Il nucleare ha un ruolo marginale: da esso proviene solo il sette per cento dell'energia prodotta nel mondo». Ma il contributo nucleare non va confrontato con la produzione complessiva di energia, bensì con la produzione di energia elettrica. E scopriamo allora che l'energia nucleare contribuisce alla copertura del fabbisogno elettrico (dati ONU-IAEA 2003) per il 35 per cento in Europa, per il 25 nei paesi dell'OCSE e per il 17 a livello mondiale: in Europa l'energia nucleare è la prima fonte di produzione elettrica, seguita dal carbone.

E veniamo a un'altra frase storica: «Il nucleare è ormai in via di abbandono nel mondo occidentale, dove non si costruiscono più reattori. Paesi come la Svezia e la Germania hanno già deciso di uscire dal nucleare». I paesi che già impiegano estesamente l'energia nucleare non costruiscono nuove centrali perché non ne hanno bisogno, in quanto hanno già raggiunto un mix produttivo diversificato. Bisogna inoltre considerare che i fattori di utilizzazione degli impianti sono passati dal 70 al 90 per cento e che la vita utile delle centrali in esercizio è passata da 30 a 50 anni: tutto ciò equivale a un raddoppio virtuale del parco nucleare installato.

In seguito a un referendum tenutosi nel 1980, la Svezia aveva effettivamente deciso di uscire dal nucleare a partire dal 1992. Ma la fermata del primo reattore (Barsebäck 1) è avvenuta dopo un decennio di ripensamenti solo all'inizio del 2000 (dopo l'ingresso determinante dei verdi nella maggioranza), dopodiché il Governo ha deciso di rinviare fino all'anno prossimo la fermata del secondo reattore «per la mancanza di alternative valide sul piano economico e ambientale». Così la Svezia ha tuttora 11 centrali nucleari in funzione, che coprono il 46 per cento del fabbisogno elettrico nazionale; la parte restante proviene dall'idroelettrico. Poiché gli svedesi hanno deciso anche di non costruire più impianti idroelettrici (per via dell'impatto ambientale) e che la sostituzione del nucleare deve avvenire senza incremento delle emissioni di gas serra, l'equazione ammette come unica soluzione l'importazione di energia elettrica dalla Danimarca (dove è prodotta con il carbone).

In Germania il Governo (anche lì con i verdi nella maggioranza) ha deciso di limitare a 35 anni la vita utile degli impianti nucleari installati. L'applicazione di questa decisione porterebbe alla chiusura dell'ultimo dei reattori oggi in funzione nel 2020. Nel frattempo le associazioni industriali e dei consumatori hanno fatto presente al Governo che il paese (che peraltro dispone di ingenti risorse carbonifere) non può permettersi di rinunciare a una fonte che copre un terzo del fabbisogno elettrico nazionale.

Il mancato decollo delle **nuove fonti rinnovabili** è legato ai **limiti fisici** che le caratterizzano

Thomas Hoepker/Magnum Photos/Contrasto

NUCLEARE D'IMPORTAZIONE. Nell'ultimo decennio abbiamo importato dall'estero tra il 15 e il 18 per cento dell'elettricità, in gran parte prodotta dalle centrali nucleari francesi. In alto, un mulino a vento davanti alla centrale nucleare di Saint Laurent des Eaux, nella valle della Loira, a circa 150 chilometri da Parigi.

L'AUTORE

UGO SPEZIA ha partecipato ai Progetti Finalizzati Energetica del CNR e allo sviluppo del Progetto unificato nucleare. Segretario generale dell'associazione italiana nucleare e membro della giunta esecutiva del Forum atomico europeo, insegna all'Università «La Sapienza» e al Pontificio Ateneo Regina Apostolorum di Roma, e allo IULM di Milano.

PER APPROFONDIRE

COLOMBO U., *Energia. Storia e scenari*, Donzelli, Roma, 1996.

LAKE J.A., BENNETT R.G. e KOTEK J.F., *L'energia nucleare della prossima generazione*, in «Le Scienze» n. 402, febbraio 2002.

VECCHIA P., TIRELLI U. e SPEZIA U., *Campi elettromagnetici e salute: dai miti alla realtà*, Edizioni 21mo Secolo, Milano, 2002.

La seconda era nucleare, in «Aspenia», rivista di Aspen Institute Italia, anno 10, n. 27, dicembre 2004.

Previsioni di domanda energetica e petrolifera italiana 2005-2020, Unione petrolifera, febbraio 2005. On line all'indirizzo: www.unionepetrolifera.it/PubblicazioniDocumenti/Previsioni%202005-2020.pdf

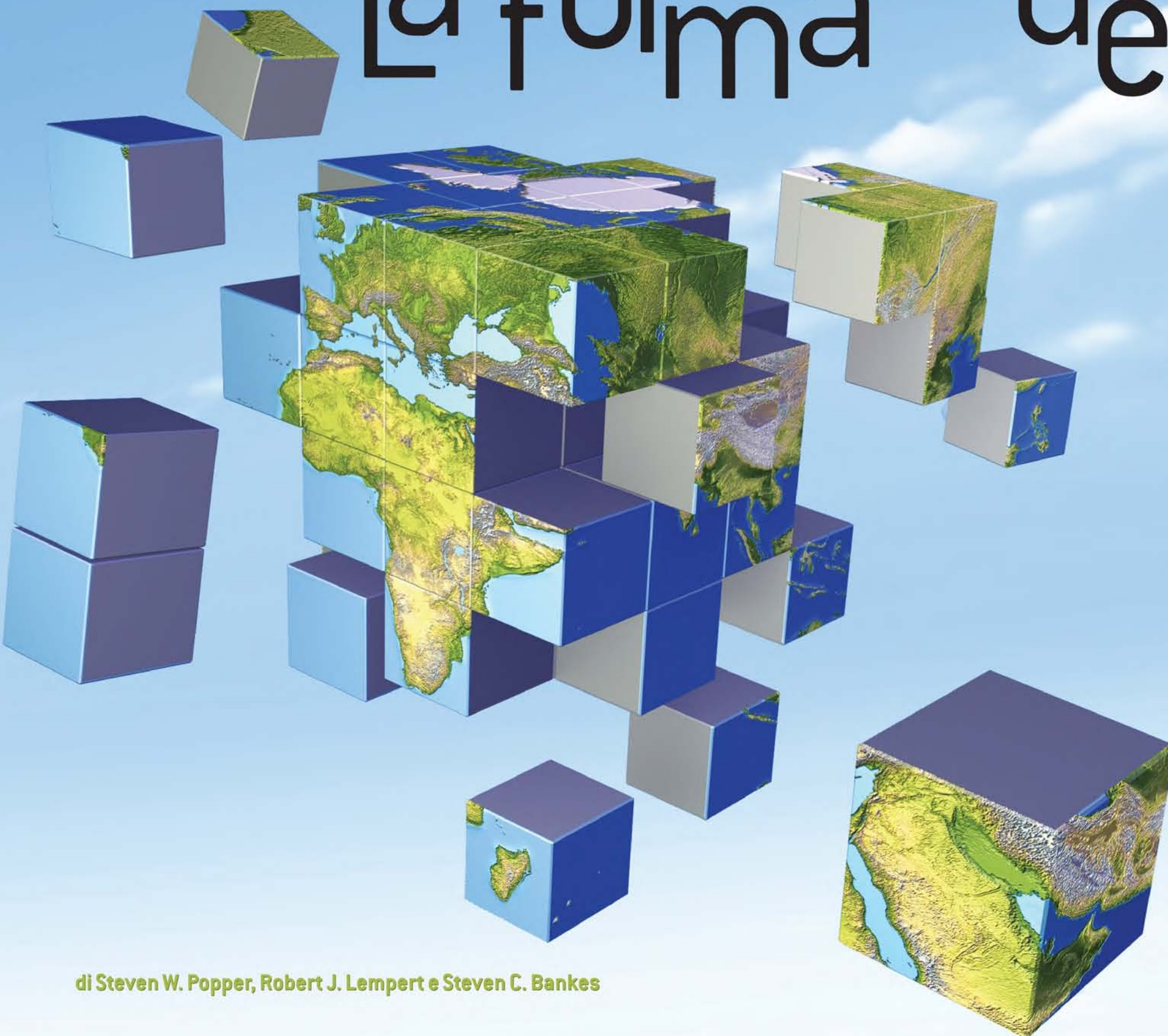
Il tempo delle riflessioni

La scelta fatta dall'Italia (unico paese al mondo ad avere chiuso dalla sera alla mattina i propri impianti nucleari) è una scelta rispettabile, ma contrasta con le scelte fatte da tutti gli altri paesi industriali avanzati, e ha prodotto la dispersione di un investimento che è stato autorevolmente valutato in 62 miliardi di euro. La decisione di puntare tutto sulle nuove fonti rinnovabili è una scelta altrettanto rispettabile, ma ha portato a un esborso di altri 51 miliardi di euro dal 1981 a oggi per ottenere un contributo dello 0,5 per cento alla copertura del fabbisogno elettrico nazionale. Questa è la realtà, e da qui bisogna partire con onestà intellettuale.

Anche a fronte di un prezzo del barile che naviga sopra i 50 dollari, la ripresa dell'impegno nel settore nucleare si scontra in Italia con problemi di diversa origine. Grazie al basso costo del combustibile, l'energia nucleare è economicamente vantaggiosa. Ma un impianto nucleare richiede un investimento iniziale e tempi di costruzione almeno doppi rispetto a quelli richiesti da una centrale convenzionale. A questi effetti si sommano le resistenze all'accettazione dell'impianto, che possono prolungare i tempi realizzativi. In queste condizioni sono gli stessi meccanismi di mercato e le norme tariffarie vigenti a ostacolare l'opzione nucleare. Per questo sono necessarie scelte politiche specifiche.

La risposta che i maggiori paesi industriali stanno dando al nuovo shock dei prezzi del petrolio è un'accelerazione dei programmi nucleari. A valle della sensibilizzazione negativa dell'opinione pubblica italiana, è difficile pensare a una riapertura dell'opzione nucleare nel breve termine. Ma certamente il paese non può permettersi di perdere definitivamente nell'inazione una cultura tecnico-scientifica e industriale destinata a rimanere essenziale per l'Italia come per tutto il mondo civile.

È ora di fare qualcosa in questa direzione. Abbiamo già imparato dove porta la gestione del problema energetico sul piano ideologico: è ora di affrontarlo seriamente sul piano tecnico ed economico. LS

La forma del futuro

Spesso l'incertezza dei risultati scientifici diventa una scusa per ignorare i problemi a lungo termine, come il cambiamento climatico. Ma non dovrebbe essere così

di Steven W. Popper, Robert J. Lempert e Steven C. Bankes

Lo scorso anno, un comitato di esperti di altissimo livello, noto come il Consenso di Copenhagen, ha stilato una classifica di priorità dei maggiori problemi ambientali, sanitari e sociali del mondo. Riunito dall'Institut for Miljøvurdering, l'istituto danese di valutazione ambientale diretto da Bjørn Lomborg, il comitato ha usato l'analisi costi/benefici per valutare in quali casi una limitata quantità di denaro possa dare il risultato migliore. Si è così concluso che la priorità maggiore dovrebbe essere attribuita alle questioni urgenti che abbiano soluzioni relativamente ben individuate, come il controllo della malaria. Le sfide a lungo termine, come il cambiamento climatico, la cui evoluzione è ancora poco chiara, e persino la portata delle loro conseguenze, sono state invece collocate agli ultimi posti.

In genere, ognuno di questi problemi è trattato singolarmente, come se potessimo permetterci il lusso di affrontare le questioni una alla volta. Il Consenso di Copenhagen ha usato tecniche d'avanguardia per cercare di promuovere una prospettiva più ampia. Nel farlo, tuttavia, è emerso che nemmeno queste tecniche riescono a cogliere un fatto semplice ma incontrovertibile: il futuro è incerto. I tentativi di prevederlo hanno una storia articolata: si va dalle dichiarazioni dell'impossibilità del volo umano alle previsioni economiche e meteorologiche catastrofiste degli anni settanta, alle affermazioni secondo cui la new economy avrebbe eliminato gli alti e bassi dell'economia tradizionale. Non è sorprendente che i responsabili politici tendano a rimanere focalizzati sul trimestre fiscale o sulle elezioni successive. Insicuri sulla rotta da seguire, navigano a vista, tenendosi ben vicini alle coste più familiari.

Questa comprensibile risposta a un futuro incerto, tuttavia, fa sì che le sfide a lungo termine nazionali e globali siano spesso ignorate o addirittura peggiorate da decisioni poco lungimiranti. Nella vita di tutti i giorni, le persone responsabili guardano al futuro a dispetto delle esigenze della quotidianità: facciamo le pulizie di casa, risparmiamo per la pensione, stipuliamo una polizza assicurativa. Gli stessi principi dovrebbero essere applicati alla società nel suo complesso. Ma come fanno i leader politici a valutare l'importanza relativa di presente e futuro? Come possono evitare di essere paralizzati dall'incertezza scientifica?

George Retseck

In situazioni note, la scienza può prevedere le conseguenze delle scelte politiche. Queste previsioni, associate ai metodi formali di analisi delle decisioni che usano modelli matematici e calcoli statistici per determinare gli interventi migliori, sono in grado di individuare i compromessi che la società deve inevitabilmente fare. Dirigenti d'azienda e politici possono non tener sempre conto di questi consigli, ma lo fanno più spesso di quanto si creda. Sono state effettuate analisi per migliorare la qualità dei processi di elaborazione di leggi, regolamenti e investimenti. La politica economica delle nazioni ne è un esempio. I concetti introdotti dagli analisti negli anni trenta e quaranta – tassi di disoccupazione, deficit corrente e prodotto interno lordo – oggi sono di dominio comune. Così i governi hanno imparato a evitare i cicli drastici di crescita e recessione che erano comuni nel XIX e XX secolo.

Il problema è che ora il mondo si trova ad affrontare una serie di sfide, sia a breve sia a lungo termine, che sono lungi dall'essere ben comprese: come conservare l'ambiente, come garantire il futuro della sicurezza sociale, come difendersi dal terrorismo, come gestire gli effetti delle nuove tecnologie. Questi problemi sono troppo complessi e contingenti perché si riescano a formulare previsioni definitive. Di fronte a questa profonda incertezza, la macchina delle previsioni e di elaborazione delle decisioni segna il passo. Gli approcci analitici tradizionali gravitano intorno alle parti conosciute della sfida ed evitano il resto. Così anche analisi sofisticate come quella del Consenso di Copenhagen fanno fatica a stabilire la validità degli interventi a breve termine che potrebbero modellare il nostro futuro a lungo termine.

Il nostro gruppo – composto da un economista, un fisico e un informatico che lavorano al RAND Pardee Center – ha cercato di ripensare il ruolo dell'analisi dalle fondamenta. Abbiamo costruito metodi rigorosi e sistematici per affrontare l'incertezza profonda. L'idea è di liberarci dalla necessità di effettuare previsioni precise, usando il computer per elaborare strategie strutturali che funzionino per un'ampia gamma di futuri possibili. Invece di tentare di eliminare l'incertezza, la mettiamo in risalto, e poi cerchiamo di gestirla. Alcune società si sono servite delle nostre metodologie per pianificare la strategia aziendale. I nostri metodi offrono un modo per uscire dall'impasse ideologica in cui ci si ritrova spesso. Permettendo ai responsabili delle scelte politiche di esplorare un'ampia varietà di scenari possibili, questo nuovo approccio riformula una domanda antica a cui è impossibile rispondere – «Che cosa ci riserva il futuro a lungo termine?» – in un'altra che rispecchia meglio le nostre preoccupazioni reali: «Quali misure adottate oggi sono più utili a dare al futuro la forma che vogliamo?».

L'approccio riproduce il modo in cui le persone affrontano le **decisioni incerte** nella vita di tutti i giorni

I pericoli della previsione

La ricerca di un equilibrio tra economia e ambiente è un esempio delle difficoltà che si incontrano quando si cerca di usare la scienza per prendere decisioni a lungo termine. Nel suo libro *Il futuro della vita*, pubblicato nel 2002, Edward O. Wilson ha descritto il dibattito tra economisti e scienziati ambientali. I primi sostengono spesso che le politiche odierne guideranno la società con successo per tutto il secolo a venire. L'innovazione tecnologica ridurrà l'inquinamento e migliorerà l'efficienza energetica, e i cambiamenti di prezzo delle merci assicureranno al momento giusto la transizione dalle risorse che scarseggiano ad altre molto più abbondanti. I secondi ritengono invece che l'attuale corso della società si dimostrerà insostenibile. Con il tempo, i segni dello stress ambientale diventeranno meno ambigui, e forse abbiamo già oltrepassato il punto in cui è possibile rimediare facilmente. Di conseguenza, sarebbe meglio tirare il freno ora piuttosto che scontrarsi in futuro, quando potrebbe essere troppo tardi.

Ma, per quanto corrette siano le loro argomentazioni, le dettagliate previsioni di entrambi gli schieramenti sono sicuramente sbagliate. Le decisioni prese ora influenzeranno il mondo per i prossimi 50-100 anni, ma nessuno può prevedere come sarà allora la vita, a prescindere dalla qualità della scienza. Le parti interessate guardano lo stesso insieme incompleto di dati, vi applicano differenti valori e ipotesi, e arrivano a conclusioni diverse. Il risultato di questo processo è uno scontro tanto aspro quanto sterile.

Il famoso, o famigerato, rapporto dei primi anni settanta *I limiti dello sviluppo* è il perfetto esempio di come gli strumenti di analisi standard spesso non riescano a mediare le posizioni di questo tipo di dibattito. Un gruppo di scienziati riuniti nel Club di Roma previde che il mondo avrebbe presto esaurito le sue risorse naturali a meno che non si prendessero immediate misure per ridurne lo sfruttamento. Questa conclusione derivava da quello che, per l'epoca, era un modello di simulazione d'avanguardia sulla dinamica dell'uso delle risorse. Il rapporto fu accolto con grande scetticismo. Fin dai tempi di Thomas Malthus, l'imminente scarsità di risorse è sempre stata compensata da nuove tecnologie, che hanno reso la produzione più efficiente e fornito risorse alternative.

Il modello non era sbagliato, era solo usato in modo improprio. Qualunque modello al computer è, per definizione, uno specchio semplificato del mondo reale, e le sue previsioni sono vulnerabili all'azione di fattori che siano stati trascurati. Il modello messo a punto per *I limiti dello sviluppo* rivelò alcuni aspetti importanti delle sfide di fronte a cui si trova la società. Nel presentare l'analisi come un pronostico, gli autori spinsero il modello oltre i suoi limiti, riducendo la credibilità dell'intero programma di ricerca.

Affrontare il futuro

Alla luce di questo fallimento, gli analisti si sono orientati verso tecniche, come la progettazione di scenari, che comportano l'esplorazione di modelli diversi di futuri possibili invece di scommettere su un'unica previsione. Per esempio, nel 1995 il Global Scenario Group, riunito presso gli Stockholm Environment Institutes, ha elaborato tre gruppi di scenari. Il gruppo dei «Mondi Convenzionali» descrive un futuro in cui l'innovazione tecnologica, trainata dai mercati e parzialmente guidata dalle politiche governative, produce crescita economica senza diminuire la qualità ambientale. Nel secondo gruppo, quello degli scenari di «Imbarbarimento», gli stessi fattori – innovazione, mercati e politica – si dimostrano inadeguati ai problemi e portano al collasso sociale e al dilagare di violenza e miseria. Il terzo, quello delle «Grandi Transizioni», descrive l'adozione diffusa di valori sociali ecocompatibili. Il Global Scenario Group riteneva che lo scenario dei Mondi Convenzionali fosse plausibile ma non garantito; per evitare il rischio dell'Imbarbarimento, quindi, la società dovrebbe seguire la strada delle Grandi Transizioni.

Benché l'analisi di scenario eviti di produrre previsioni definitive, presenta anch'essa i suoi inconvenienti. In primo luogo, affronta solo alcuni dei molti modelli di futuro possibili, prestando il fianco all'accusa di aver effettuato scelte arbitrarie. Ancora più importante è l'obiezione che i gruppi di scenari non possono essere facilmente tradotti in piani d'azione. Come vanno usati gli scenari? I politici devono concentrarsi sull'ipotesi più minacciosa o su quella che gli esperti ritengono più probabile? Ogni approccio ha le sue pecche.

L'Unione Europea ha spesso adottato il «principio di precauzione», che, in sintesi, basa le scelte politiche sugli scenari più disastrosi. Il Protocollo di Kyoto sul cambiamento climatico, per esempio, prevede la riduzione dei gas serra anche se i loro effetti a lungo termine non sono ancora chiari. Da un certo punto di vista, il principio di precauzione è perfettamente ragionevole: è meglio prevenire che curare. Il futuro a lungo termine sarà sempre oscuro, e alcuni pericoli possono diventare realtà quando è troppo tardi per prevenirli. Ma è anche una guida imperfetta. Il futuro presenta molte potenziali minacce: dobbiamo preoccuparci di tutte allo stesso modo? Le scelte prive di rischi sono poche, e il principio di precauzione può portare a conclusioni contraddittorie. Per esempio, sia la minaccia delle emissioni di gas serra sia i costi della loro riduzione sono variabili difficili da quantificare. Per salvaguardare l'ambiente, dovremmo ridurre le emissioni già da ora, ma per salvaguardare l'economia dovremmo rimandare tale riduzione. Insomma, come dobbiamo comportarci?

Negli Stati Uniti, invece, si tende a preferire l'analisi costi/benefici, che permette di valutare i vantaggi dell'eliminazione di ogni potenziale minaccia confrontandoli con le spese necessarie. Ciò è utile soprattutto in casi di grande incertezza. Per esempio, saremmo sicuramente disposti a pagare fino a 500 dollari per eliminare un danno da 1000 che si avvererà con una probabilità del 50 per cento. In molte circostanze, l'analisi costi/benefici fornisce risposte non ambigue. Per fare un caso pratico, il piombo nei carburanti entra nell'ambiente e influenza lo sviluppo cerebrale dei bambini. Anche se non si conosce il numero di bambini colpiti, il vantaggio di rimuovere il piombo dalla benzina è molto superiore ai costi. Ma raramente il futuro a lungo termine offre scelte così facili. Spesso né i costi né i benefici sono sufficientemente chiari: lievi disaccordi nella valutazione degli inconvenienti possono determinare una grande differenza nella politica da attuare.

First Light / Corbis

LA PIANIFICAZIONE A LUNGO TERMINE è parte della vita quotidiana: andare a scuola, stipulare un'assicurazione e via dicendo. **Ma è difficile farla entrare nei processi decisionali di governi e aziende.**

In sintesi/*Gestire l'incertezza*

- La scienza è ormai parte essenziale del processo decisionale politico ed economico, ma negli schemi di riferimento usati per effettuare delle scelte può esservi una notevole incertezza. Spesso così si finisce col non fare nulla o col prendere iniziative che peggiorano le prospettive a lungo termine.
- Gli autori hanno sviluppato uno schema alternativo incentrato sulla flessibilità, elaborando, verificando e integrando strategie che funzionano bene qualunque cosa succeda.
- Le strategie possono avere meccanismi che cambiano con le circostanze. Per il riscaldamento climatico, uno di questi meccanismi è la «valvola di sicurezza» per garantire che la riduzione delle emissioni avvenga ma non sia troppo costosa.

Il principio della solidità

Strumenti tradizionali come l'analisi costi/benefici si basano su un paradigma che si può sintetizzare così: «prima prevedi, poi agisci». Essi richiedono una previsione del futuro come premessa all'elaborazione della politica in grado di funzionare meglio nelle circostanze attese. Poiché esigono che tutti siano d'accordo sui modelli e sulle ipotesi, queste analisi non riescono a risolvere molti dei dibattiti cruciali che la nostra società ha di fronte a sé. Esse obbligano a scegliere una tra le molte prospettive future plausibili e in competizione tra loro. Qualunque scelta emerga, è esposta a errori e sorprese.

Il nostro approccio consiste nel cercare non le strategie ottimali, ma quelle solide. Una strategia solida si comporta bene quando viene confrontata con le alternative in un'ampia gamma di modelli di futuro plausibili. Non si tratta necessariamente della strategia ottimale in qualunque scenario futuro, ma porterà risultati soddisfacenti sia nei modelli di futuro facili da prevedere sia nelle contingenze difficili da anticipare.

Questo approccio rispecchia un po' il modo in cui spesso ragionano le persone di fronte alle decisioni della vita quotidiana. Herbert A. Simon, premio Nobel negli anni cinquanta per i suoi studi sui processi decisionali, ha osservato che nelle nostre scelte raramente vi è ottimizzazione. Piuttosto, si cercano strategie che possano funzionare abbastanza bene, ovvero che comprendano una protezione verso i diversi potenziali risultati, e che siano adattabi-

li. Il domani porterà informazioni che non sono disponibili oggi; perciò le persone mettono in conto di rivedere i propri piani.

Un tempo era impossibile integrare la solidità e l'adattabilità in un'analisi di decisione formale a causa del gran numero di calcoli richiesti, un ostacolo oggi superato grazie alla tecnologia. Confrontarsi con la profonda incertezza, tuttavia, richiede più della potenza di calcolo: bisogna usare i computer in modo diverso. I tradizionali metodi «prevedi e poi agisci» trattano il computer come una calcolatrice gigante: gli analisti selezionano il modello e specificano le ipotesi, e il computer calcola la strategia ottimale in base a questi input.

Al contrario, per fare scelte con una base solida, il computer deve essere parte integrante del processo di elaborazione, mettere alla prova e valutare le strategie candidate cercando gli scenari plausibili che potrebbero determinarne il fallimento. Un processo decisionale solido unisce le capacità complementari di uomini e macchine. Gli esseri umani sono bravissimi nel cercare schemi, stabilire inferenze e formulare domande, ma possono fallire nel riconoscimento di fattori avversi e perdere il filo tra lunghe catene di eventi che collegano cause ed effetti. La macchina garantisce che tutte le dichiarazioni sulle strategie siano coerenti con i dati e può svelare scenari che si scontrano con i pregiudizi umani. Ovviamente, nessuna strategia è completamente immune da incertezze, ma il computer aiuta i politici a sfruttare tutte le informazioni di cui dispongono per prendere decisioni che reggano in un'ampia gamma di sviluppi e sorprese.

GLI AUTORI

STEVEN W. POPPER, ROBERT J. LEMPERT e STEVEN C. BANKES lavorano alla RAND Corporation di Santa Monica, in California, uno dei serbatoi di intelligenze più rinomati degli Stati Uniti. Popper è un economista che studia l'integrazione delle innovazioni tecnologiche nelle organizzazioni. Lempert è un fisico specializzato nelle politiche ambientali ed energetiche. Bankes si occupa di *computer science* ed è il padre dei nuovi metodi di simulazione al computer. I tre hanno lavorato con organizzazioni come l'Office of Science and Technology Policy della Casa Bianca, il Department of Defense, la National Science Foundation e l'ONU.

PER APPROFONDIRE

BANKES S.C., *Exploratory Modeling for Policy Analysis*, in «Operations Research», Vol. 41, n. 3, pp. 435-449, maggio-giugno 1993.

DEWAR J.A., *Assumption-Based Planning*, Cambridge University Press, 2002.

LEMPERT R.J. e POPPER S.W., *High-Performance Government in an Uncertain World*, in *High Performance Government: Structure, Leadership, Incentives*, Klitgaard R. e Light P.C. (*a cura*), RAND-MG-256, 2005.

Il fallimento delle previsioni del passato dovrebbe scoraggiare chiunque dal dire di vederci chiaro

Sviluppo sostenibile

Per capire come funziona questo approccio, ritorniamo al dilemma dello sviluppo sostenibile. Il primo passo è definire esattamente che cosa debba calcolare il computer. Un processo decisionale fondato su solide basi chiede alla macchina di generare percorsi multipli nel futuro, esplorando l'intera diversità degli sviluppi possibili. Se anche non sapremo che cosa succederà di preciso, qualunque strategia che funzioni per un insieme abbastanza ampio di scenari generati dal computer ha maggiore probabilità di essere all'altezza di ciò che accadrà davvero.

Nella nostra analisi usiamo una versione aggiornata del modello Wonderland ideato dall'economista Warren C. Sanderson della Stony Brook University e dell'Istituto internazionale per l'analisi dei sistemi applicati (IIASA) di Laxenburg, in Austria. La simulazione Wonderland integra, in forma semplificata, le conoscenze sulle dinamiche dell'economia globale, della demografia e dell'ambiente. La crescita della popolazione e del benessere aumenteranno l'inquinamento, mentre l'innovazione tecnologica potrà ridurlo. L'inquinamento, a sua volta, danneggia l'economia quando grava sull'ambiente oltre le sue capacità di assorbimento.

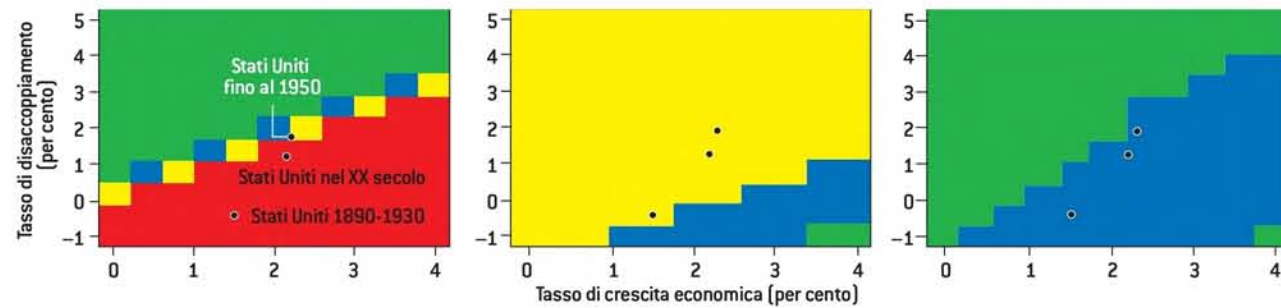
La nostra versione del Wonderland è simile a quella usata per *I limiti dello sviluppo*, anche se è molto più semplice perché ha solo 41 parametri incerti. Questa semplicità può essere un pregio; l'esperienza, infatti, dimostra che, se la struttura del modello o gli input rimangono incerti, il maggiore dettaglio di per sé non rende le previsioni più accurate. Per una solida pianificazione, i modelli andrebbero usati non per prevedere ma per produrre una gamma di scenari, tutti coerenti con le conoscenze di cui disponiamo.

Inserendo i modelli in uno speciale software di «modellizzazione esplorativa» gli analisti possono verificare più strategie e vedere come funzionano. L'utente umano propone una strategia; il computer la confronta, per ciascuno scenario, con la strategia ottimale (quella che sarebbe stata scelta con una previsione perfetta), valutandone gli effetti in base a parametri come il reddito o la speranza di vita. Un'elaborazione sistematica rivela i modelli di futuro in cui le strategie proposte potrebbero funzionare male e mette in luce il modo in cui ciascuna strategia potrebbe essere modificata per gestire meglio questi modelli di futuro.

Nell'esempio della sostenibilità, abbiamo applicato il modello fino all'anno 2100. Le due incertezze chiave erano il tasso di crescita economica globale durante il periodo e il «tasso di disaccoppiamento» corrente (cioè la riduzione dell'inquinamento per unità di output economico in assenza di nuove politiche ambientali). Il tasso di disaccoppiamento sarà positivo se le normative esistenti, gli aumenti di produttività e lo spostamento verso un'economia di servizi diminuiranno l'inquinamento senza far diminuire la crescita. Viceversa sarà negativo se la crescita implica un aumento dell'inquinamento.

A seconda dei valori di queste variabili, le strategie danno risultati diversi. Una, chiamata *Stay the Course*, prosegue semplicemente le politiche attuali e funziona bene nei modelli di futuro in cui il tasso di disaccoppiamento è maggiore del tasso di crescita; se è vero il contrario, però, l'inquinamento diventa così grave che

Bilanciare economia e ambiente

Come possiamo ripulire il pianeta senza fare bancarotta? La risposta dipende da quanto velocemente crescerà l'economia e in che misura le tendenze e i regolamenti attuali abbasseranno l'inquinamento, due variabili che nessuno può dire di conoscere. Molti degli approcci proposti (*a sinistra e al centro*) potrebbero raggiungere un buon equilibrio per alcuni tassi di crescita ma non per altri, mentre una strategia flessibile (*a destra*) potrebbe essere valida in un ampio intervallo di scenari. Nei grafici sotto, le aree colorate corrispondono a particolari tassi di crescita e di «disaccoppiamento» (il ritmo a cui le attuali tendenze abbassano l'inquinamento) futuri. I colori rappresentano il grado con cui, per ciascuno scenario, la strategia corrisponde alla strategia ottimale dal punto di vista teorico: perfetto (■), accettabile (■), scarso (■), molto scarso (■). I punti rappresentano i tassi storici, che possono fornire un indizio di ciò che può succedere.

La strategia *Stay the Course* non elabora alcuna nuova politica ambientale. È un buon approccio se il tasso di disaccoppiamento è alto; altrimenti è inadeguata.

Il *Crash Program* è un drastico tentativo di ridurre l'inquinamento. Si giustifica solo se il tasso di disaccoppiamento risulta spontaneamente molto basso.

La nostra strategia flessibile si pone come obiettivo il taglio delle emissioni ma rimanda le scadenze se il costo diventa troppo elevato. Funziona in quasi tutti i casi possibili.

Johnny Johnson

i politici devono abbandonare la strategia e ovviare al danno. Nel XX secolo la crescita e i tassi di disaccoppiamento erano all'incirca uguali; se le cose andranno così anche nel XXI secolo, il mondo sarà in bilico tra successo e fallimento (*si veda il box qui sopra*).

Il più aggressivo *Crash Program* investe denaro in sviluppo tecnologico e normative ambientali che spingano il disaccoppiamento oltre il suo tasso attuale. Sebbene questa strategia elimini il rischio di catastrofe, può imporre alti costi non necessari, ostacolando la crescita economica.

Diventare flessibili

Entrambe le strategie coinvolgono politiche fissate in anticipo; una strategia flessibile le migliora entrambe. Ispirati dai punti di forza e di debolezza delle due politiche, abbiamo considerato un'alternativa flessibile che impone limiti di emissione rigorosi ma li ammorbidisce se i costi sono troppo alti. Se gli ottimisti avranno ragione il tetto di spesa non viene mai sfondato e l'industria raggiunge obiettivi ambientali notevoli. Se invece avranno ragione i pessimisti le rigorose restrizioni sull'inquinamento saranno maggiori del tetto di spesa concordato, nel qual caso la strategia dà all'industria più tempo per raggiungere gli obiettivi. Una strategia flessibile può aiutare a destreggiarsi nei dibattiti più controversi fornendo piani d'azione su cui tutti possono essere d'accordo, indipendentemente da quale modello di futuro si rivelerà corretto. È simile alle strategie della «valvola di sicurezza» che alcuni economisti hanno proposto come alternativa agli obiettivi di taglio delle emissioni del Protocollo di Kyoto, che non sono rinegoziabili. Il nostro armamentario analitico permette sia di progettare tali strategie sia di dimostrarne l'efficacia ai gruppi d'interesse coinvolti.

Ovviamente anche le strategie flessibili hanno il loro tallone d'Achille. La combinazione di obiettivi ambientali e limitazioni dei costi che funziona meglio nella maggior parte dei modelli di futuro, per esempio, si comporta male quando l'innovazione tecnologica si dimostra estremamente costosa. Per aggirare il problema, si può ripetere l'analisi per proporre una varietà di strategie solide, ciascuna delle quali si declina in differenti condizioni. Una strategia può funzionare bene quando un'altra fallisce, e viceversa, così la scelta richiede un inevitabile compromesso. I computer calcolano con quale probabilità ciascun insieme di circostanze dovrebbe far prevalere una strategia sull'altra. Il nostro metodo riduce così un problema complesso a un piccolo numero di scelte semplici. Così è possibile concentrarsi sui dibattiti fondamentali, pienamente consapevoli delle sorprese che il futuro può portare.

Questo approccio è applicabile non solo allo sviluppo sostenibile ma anche a molte altre questioni: mettere sul mercato nuovi prodotti, gestire i piani di welfare, persino combattere il terrorismo. Scienza e tecnologia non possono influire sulla fondamentale imprevedibilità del futuro, ma possono offrire una risposta a molti interrogativi.

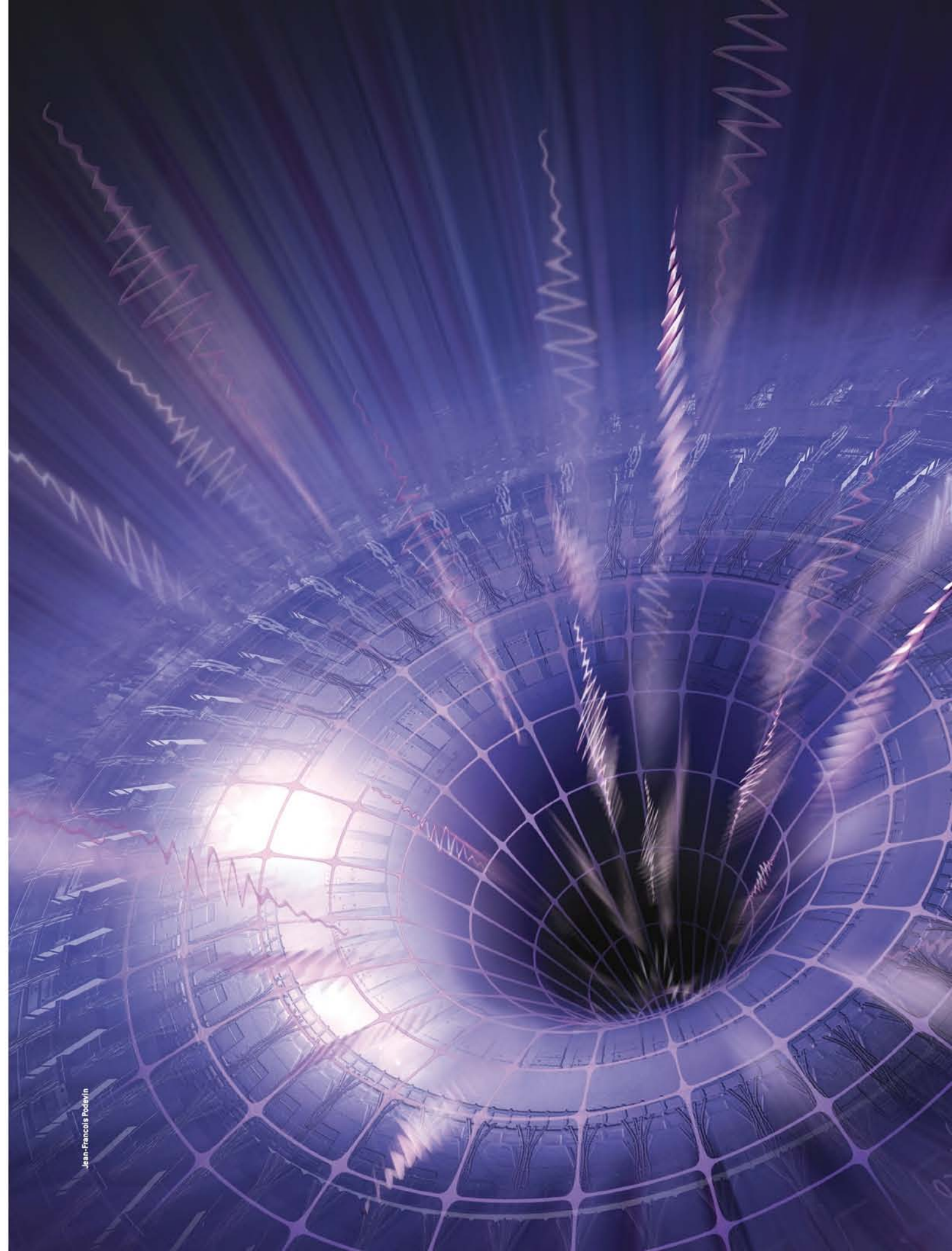
Il fallimento delle previsioni del passato dovrebbe scoraggiare chiunque dichiari di vederci chiaro per il decennio a venire. Paradossalmente, però, la nostra possibilità di influenzare il futuro può estendersi precisamente su quelle scale temporali dove il nostro sguardo si fa meno penetrante. Spesso abbiamo un effetto limitato su un prevedibile scenario futuro a breve termine soggetto a forze ben comprese. Dove il futuro è mal definito e imprevedibile, invece, le nostre azioni possono avere i loro effetti più profondi. Nuovi strumenti possono aiutarci a tracciare la mappa che ci guiderà sulla strada più positiva.

Buchi neri in laboratorio

Non tutti i buchi neri si formano dal collasso di una stella. Con un po' di fortuna, presto anche i fisici potranno usare gli acceleratori di particelle per creare «mini buchi neri»

di Bernard Carr e Steven B. Giddings

Da quando, circa ottant'anni fa, i fisici hanno inventato gli acceleratori di particelle, se ne sono serviti per scopi esotici come la fissione atomica, la trasmutazione di elementi, la produzione di antimateria e la creazione di particelle precedentemente non osservate in natura. Ma con un po' di fortuna tra qualche tempo dovranno superare una sfida che farà sembrare queste imprese quasi banali. Gli acceleratori potrebbero infatti produrre gli oggetti più misteriosi dell'universo: i buchi neri. Quando si pensa ai buchi neri, di solito li si immagina come enormi mostri in grado di inghiottire astronavi, o addirittura stelle, in un sol boccone. Ma i buchi neri che potrebbero essere prodotti dagli acceleratori ad alte energie – forse già nel 2007, quando al CERN entrerà in attività il Large Hadron Collider (LHC) – sono lontani cugini di quei leviatani stellari. Si tratterà di buchi neri microscopici, paragonabili in grandezza alle particelle elementari, che non potrebbero dilaniare stelle, dominare galassie o minacciare il nostro pianeta, ma che, sotto alcuni punti di vista, avrebbero proprietà anche più spettacolari. A causa degli effetti quantistici, svanirebbero poco dopo essersi formati, illuminando i rivelatori di particelle come alberi di Natale. Ma potrebbero darci un'idea di come è strutturato lo spazio-tempo, e dirci se esistano altre dimensioni invisibili.

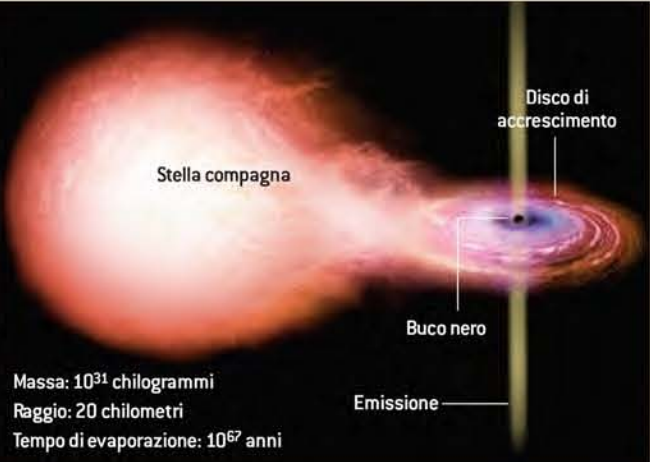
Jean-Francois Podevin

Il concetto di buco nero nella sua forma moderna emerge dalla teoria della relatività generale di Einstein, che predice che se la materia è sufficientemente compressa la sua gravità diviene così forte da creare una regione di spazio da cui nulla può sfuggire. La frontiera di questa regione è l'orizzonte degli eventi del buco nero: gli oggetti vi possono cadere dentro, ma nulla ne può uscire. Nel caso più semplice, in cui lo spazio non ha dimensioni nascoste o, se le ha, sono più piccole del buco nero, la sua dimensione è proporzionale alla sua massa. Se si comprimesse il Sole fino a un raggio di tre chilometri, circa quattro milionesimi del suo raggio reale, diventerebbe un buco nero. Perché alla Terra accada lo stesso, la si dovrebbe comprimere fino a farle avere un raggio di nove millimetri, circa un miliardesimo del suo raggio.

Quindi, più è piccolo il buco nero, maggiore è il grado di compressione necessario per crearlo. La densità a cui deve essere compressa la materia è proporzionale all'inverso del quadrato della massa. Per un buco con la massa del Sole la densità è di circa 10^{19} chilogrammi per metro cubo, maggiore di quella di un nucleo atomico. Una tale densità è all'incirca la più alta che si possa ottenere mediante collasso gravitazionale nell'universo attuale. Un corpo più leggero del Sole resiste al collasso perché è stabilizzato dalle forze quantistiche di repulsione tra le particelle subatomiche. A quel che se ne sa dalle osservazioni, i più leggeri tra i candidati buchi neri hanno una massa circa sei volte quella del Sole.

Il collasso stellare però non è l'unico modo in cui si possono formare i buchi neri. All'inizio degli anni settanta Stephen Hawking e uno degli autori di questo articolo (Carr) studiarono un meccanismo di generazione di buchi neri nell'universo appena formato. Questi buchi neri sono chiamati «primordiali». Con l'espandersi dello spazio, diminuisce la densità media della materia; perciò la materia era molto più densa in passato, al punto da superare la densità che avevano i nuclei atomici entro il primo microsecondo dal big bang. Le leggi della fisica note permettono una densità della materia non superiore al cosiddetto valore di Planck; vale a dire 10^{97} chilogrammi per metro cubo, la densità a cui la forza di gravità diventa così elevata che le fluttuazioni quantistiche distruggerebbero la struttura dello spazio-tempo.

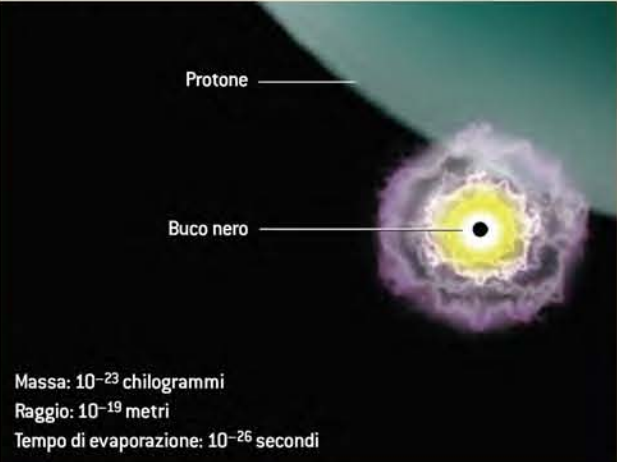
TRE MODI PER CREARE UN BUCO NERO

FLUTTUAZIONI DI DENSITÀ PRIMORDIALI
Ai primordi della storia del nostro universo lo spazio era riempito di plasma caldo e denso. La densità variava da punto a punto e, là dove la densità relativa era sufficientemente alta, il plasma poteva collassare in un buco nero.

COLLISIONI DI RAGGI COSMICI
I raggi cosmici, particelle dotate di alta energia provenienti da supernove e altri eventi violenti, potrebbero collidere con l'atmosfera terrestre formando buchi neri che decadono emettendo radiazioni e particelle secondarie che possono essere rivelate a terra.

ACCELERATORE DI PARTICELLE
Un acceleratore come il Large Hadron Collider del CERN potrebbe far collidere due particelle a velocità tale da farle collassare in un buco nero. I rivelatori registrerebbero il successivo decadimento del buco nero.

Don Dixon

Una densità così elevata sarebbe stata sufficiente a creare buchi neri con un diametro di appena 10^{-35} metri (una misura nota come lunghezza di Planck) con una massa di 10^{-8} chilogrammi (la massa di Planck).

Questo è il buco nero più leggero possibile secondo la descrizione convenzionale della gravità. Ha una massa molto maggiore ma un diametro molto minore di una particella elementare. Buchi neri primordiali sempre più pesanti potrebbero essersi formati al diminuire della densità cosmica. Qualunque buco nero più leggero di 10^{12} chilogrammi sarebbe ancora più piccolo di un protone, ma oltre questa massa i buchi neri sarebbero grandi come oggetti fisici più familiari. Quelli che si formarono all'epoca in cui la densità cosmica era pari a quella nucleare avrebbero una massa paragonabile a quella del Sole, perciò sarebbero macroscopici.

Le alte densità dell'universo delle origini sono una condizione necessaria ma non sufficiente per la formazione di buchi neri primordiali. Perché una regione smetta di espandersi e collassi in un buco nero, deve essere stata più densa della media, e quindi sono necessarie anche fluttuazioni della densità. Gli astronomi sanno che queste fluttuazioni ci sono state, almeno su larga scala; altrimenti non si sarebbero mai formate strutture come le galassie o gli ammassi di galassie. Perché si formassero i buchi neri primordiali, queste fluttuazioni devono essere state più forti su piccola che su larga scala, il che è possibile ma non inevitabile. Persino in assenza di fluttuazioni, si sarebbero potuti formare spontaneamente buchi neri durante transizioni di fase cosmologiche: per esempio, quando l'universo concluse il suo primo periodo di espansione accelerata, l'inflazione, o

DUE TIPI DI BUCHI NERI

Si ritiene che i buchi neri astronomici siano cadaveri di stelle massicce che sono collassate sotto il proprio stesso peso. Via via che la materia cade al loro interno, si comportano come centrali idroelettriche cosmiche, sviluppando energia potenziale gravitazionale, la sola fonte di energia che possa spiegare l'intensità dei raggi X e delle emissioni gassose di sistemi come la stella binaria a raggi X raffigurata qui sopra.

La massa dei mini buchi neri varia da quella di un granello di polvere a quella di una stella. Essi potrebbero essere emersi dal ribollire della materia in collasso poco dopo il big bang. Le ricerche dell'ultimo decennio suggeriscono che buchi neri anche più leggeri possano essere creati da collisioni di particelle nell'universo attuale. Anziché inghiottire materia, emetterebbero radiazioni e decadrebbero rapidamente.

Don Dixon

In sintesi/*Fabbriche di buchi neri*

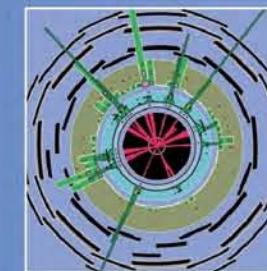
- I buchi neri non sono necessariamente mastodontici come di solito ce li immaginiamo. La teoria prevede che abbiano un'enorme varietà di misure, e che alcuni siano addirittura più piccoli delle particelle subatomiche. I piccoli buchi neri dovrebbero essere distrutti dagli effetti quantistici, e i piccolissimi esploderebbero quasi subito dopo essersi formati.
- I piccoli buchi neri potrebbero essere un residuo delle prime fasi del big bang, e gli astronomi potrebbero riuscire a individuarne alcuni, mentre esplodono oggi.
- Di recente, è stato ipotizzato che si possano formare piccoli buchi neri in collisioni nell'universo attuale, persino al contatto tra i raggi cosmici e l'atmosfera terrestre, in cui si dovrebbero produrre radiazioni e cascate di particelle che potrebbero essere registrate dagli strumenti a terra.
- Un tempo si pensava che le energie richieste fossero troppo alte, ma se lo spazio ha dimensioni aggiuntive con certe proprietà, allora la soglia di energia per la produzione di buchi neri è molto più bassa. Se è così, si potrebbero produrre buchi neri all'LHC del CERN e in collisioni di raggi cosmici alle sommità dell'atmosfera.

GLI AUTORI

BERNARD CARR e STEVEN B. GIDDINGS hanno cominciato la loro collaborazione in occasione del convegno per la celebrazione del sessantesimo compleanno di Stephen W. Hawking, nel 2002. Carr fa risalire il suo entusiasmo per l'astrofisica al 1970, al famoso documentario televisivo della BBC *The Violent Universe* di Nigel Calder. Studiò con Hawking negli anni settanta, è stato uno dei primi scienziati a studiare i piccoli buchi neri e attualmente è professore al Queen Mary (Università di Londra). Giddings afferma che ha contratto il morbo della fisica quando suo padre gli parlò per la prima volta delle curiose proprietà della meccanica quantistica. Sarebbe poi diventato un esperto di gravità quantistica e cosmologia. È stato tra i primi a studiare la possibilità di creare buchi neri negli acceleratori di particelle, e ora è professore all'Università della California a Santa Barbara.

all'epoca della densità nucleare, quando particelle come i protoni si condensarono dalla zuppa dei quark che li costituiscono. I cosmologi possono anzi dedurre importanti vincoli per i modelli dell'universo delle origini proprio dal fatto che nei buchi neri primordiali non cadde troppa materia.

Apparizioni, sparizioni

Aver capito che i buchi neri possono essere anche di piccole dimensioni spinse Hawking a considerare quali effetti quantistici possano entrare in gioco; nel 1974 giunse così alla famosa conclusione che i buchi neri non solo inghiottono particelle ma possono anche sputarle fuori. Hawking predisse che un buco nero produce un irradiamento termico, come un carbone incandescente, con una temperatura inversamente proporzionale alla sua massa. Per un buco nero di massa pari a quella del Sole, la temperatura è circa un milionesimo di grado kelvin, un valore del tutto trascurabile nell'universo attuale. Ma per un buco nero di 10^{12} chilogrammi, che è circa la massa di una montagna, la temperatura è di 10^{12} gradi kelvin: abbastanza da emettere sia particelle prive di massa come i fotoni, sia particelle dotate di massa come gli elettroni e i positroni.

LA SIMULAZIONE DEL DECADIMENTO di un buco nero mostra un acceleratore di particelle e un rivelatore in sezione trasversale. Dal centro dell'acceleratore (*cerchio nero*) emergono particelle (*raggi*) registrate dagli strati del rivelatore (*anelli concentrici colorati*).

Don Dixon; C. M. Harris, Università di Cambridge, e The Atlas Collaboration (*all'estremo destra*)

Dato che l'emissione porta con sé energia, la massa del buco nero tende a diminuire. Quindi un buco nero è altamente instabile. Via via che si contrae diventa sempre più caldo, emettendo particelle dotate di energia sempre maggiore e contraendosi sempre più velocemente. Quando il buco nero è ridotto a una massa di circa 1000 tonnellate, la partita è finita: nel giro di un secondo esplode con l'energia di una bomba nucleare di un milione di megaton. Il tempo complessivo impiegato da un buco nero per evaporare completamente è proporzionale al cubo della sua massa iniziale. Per un buco nero di massa pari a quella del Sole, la durata della vita è di 10^{64} anni. Per uno di 10^{12} chilogrammi è di 10^{10} anni, l'ordine di grandezza dell'età attuale dell'universo. Quindi qualsiasi buco nero primordiale di questa massa sarebbe sul punto di completare la propria evaporazione e di esplodere proprio ora, e uno più piccolo sarebbe evaporato in epoche cosmologiche precedenti.

Gli studi di Hawking furono un formidabile progresso concettuale, perché unificarono tre aree della fisica precedentemente scollegate: la relatività generale, la teoria quantistica e la termodinamica. Furono anche un passo avanti verso il completamento di una teoria quantistica della gravità. Persino se non si fossero mai veramente formati buchi neri primordiali, ragionare su di essi ha portato a importanti scoperte fisiche. Quindi può essere utile studiare qualcosa anche se non esiste.

In particolare, queste scoperte rivelarono un profondo paradosso che va dritto al centro della difficoltà di conciliare relatività generale e meccanica quantistica. Secondo la teoria della relatività, l'informazione su ciò che cade in un buco nero è persa per sempre. Ma se il buco nero evapora che cosa succede all'informazione contenuta al suo interno? Hawking propose che i buchi neri evaporassero completamente, distruggendo l'informazione, in contraddizione con i principi fondamentali della meccanica quantistica. Ma la distruzione dell'informazione è in contrasto con la legge di conservazione dell'energia, il che rende inammissibile questo scenario.

Altrettanto improbabile è l'alternativa che i buchi neri lascino dietro di sé dei residui. Per codificare tutta l'informazione che può essere caduta nel buco nero, questi residui dovrebbero essere di infiniti tipi diversi. Le leggi della fisica prevedono che la velocità di produzione di una particella sia proporzionale al numero di tipi di quella particella. Perciò i resti del buco nero dovrebbero essere prodotti a un ritmo infinito: sarebbero generati persino da processi fisici quotidiani come l'accensione di un forno a microonde, e la natura sarebbe catastroficamente instabile. Una terza possibilità è che non sia valida la località, il concetto che eventi in punti spazialmente separati possano influenzarsi l'un l'altro solo dopo che la luce ha avuto il tempo di viaggiare dall'uno all'altro. Questo enigma lascia tuttora perplessi gli studiosi (si veda *Computer a buchi neri*, di S. Lloyd e Y.J. Ng, in «Le Scienze» n. 439, gennaio 2005).

Alla ricerca di buchi neri

In fisica il progresso di solito richiede un'interazione con la pratica sperimentale, per cui i quesiti sollevati dai buchi neri microscopici ne giustificano la ricerca empirica. Una possibilità è che gli astronomi riescano a individuare buchi neri primordiali con una massa iniziale di 10^{12} chilogrammi che esplodono nell'universo attuale. La maggior parte della massa di questi buchi neri si trasformerà in raggi gamma. Nel 1976 Hawking e Don Page si resero conto che le osservazioni della radiazione di fondo a raggi gamma impongono rigidi limiti superiori al numero di questi buchi neri. Non era possibile, per esempio, che costituissero una parte significativa della materia oscura dell'universo, e raramente le loro esplosioni sarebbero abbastanza vicine da essere individuabili. A metà degli anni novanta, però, David Cline dell'Università della California a Los Angeles ipotizzò che le emissioni di raggi gamma più brevi possano provenire da buchi neri primordiali. Anche se si pensa che le emissioni più lunghe abbiano a che fare con stelle che esplodono o si uniscono, gli eventi brevi possono avere una spiegazione diversa. La questione dovrebbe essere risolta da osservazioni future, ma la possibilità di sondare le fasi finali dell'evaporazione dei buchi neri con osservazioni astronomiche è un'idea affascinante.

Produrre buchi neri usando acceleratori di particelle è una possibilità ancora più stimolante. Quando si tratta di produrre densità elevate, nessuno strumento supera acceleratori come LHC e il Tevatron del Fermi National Accelerator di Chicago. Queste macchine accelerano particelle subatomiche come i protoni a velocità vicinissime a quella della luce. Le particelle hanno così un'energia cinetica enorme. In LHC un protone raggiungerà un'energia di circa 5 teraelettronvolt (TeV). Secondo la famosa equazione di Einstein $E=mc^2$, questa energia è equivalente a una massa di 10^{-23} chilogrammi, 7000 volte la massa a riposo del protone. Quando due di queste particelle collidono, la loro energia è concentrata in una minuscola regione di spazio. Così è lecito supporre che, una volta o l'altra, le particelle in collisione siano tanto vicine da formare un buco nero.

Così com'è, questo ragionamento ha un problema: una massa di 10^{-23} chilogrammi è ben lontana dal valore di Planck di 10^{-8}, che secondo la teoria convenzionale della gravità è la massa del più leggero buco nero possibile. Questo limite inferiore è conseguenza del principio di indeterminazione. Dato che le particelle si comportano anche come onde, sono distribuite su una distanza che decresce al crescere dell'energia: alle energie di LHC, è circa 10^{-19} metri. Quindi questa è la più piccola regione in cui si può stipare l'energia dei protoni. Essa permette una densità di 10^{34} chilogrammi per metro cubo, che è alta, ma non abbastanza da creare un buco nero. Perché una particella sia al contempo abbastanza pesante e abbastanza compatta da formare un buco nero, deve avere la massa di Planck, che è di un fattore 10^{15} al di là dell'energia di LHC. Anche se gli acceleratori potessero creare oggetti matematicamente collegati ai buchi neri (e secondo alcuni teorici l'hanno già fatto), i buchi neri veri e propri sarebbero al di là della loro portata.

Verso altre dimensioni

Nell'ultimo decennio però i fisici si sono resi conto che la stima della densità di Planck necessaria poteva essere troppo alta. La teoria delle stringhe, una delle principali

aspiranti al ruolo di teoria quantistica della gravità, prevede che lo spazio abbia altre dimensioni oltre alle tre già note. A differenza delle altre forze, la gravità potrebbe propagarsi in queste dimensioni e quindi assumere una forza inaspettatamente elevata su brevi distanze. In tre dimensioni la forza di gravità quadruplica quando si dimezza la distanza tra due oggetti, ma in nove dimensioni l'attrazione gravitazionale diventerebbe 256 volte più forte. Questo effetto può essere molto rilevante se le dimensioni spaziali extra sono sufficientemente grandi, ed è stato molto studiato negli ultimi anni. Ci sono anche altre configurazioni di dimensioni aggiuntive, note come compattamenti contorti (*warped compactifications*), che hanno l'effetto di aumentare la gravità e sono anche più probabili se la teoria delle stringhe è corretta.

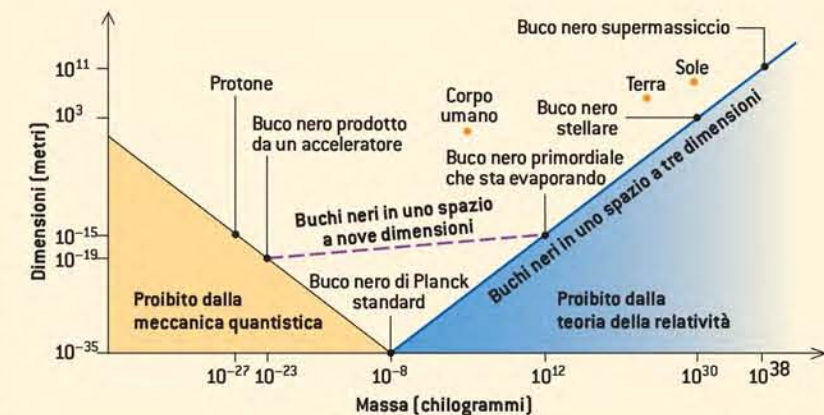
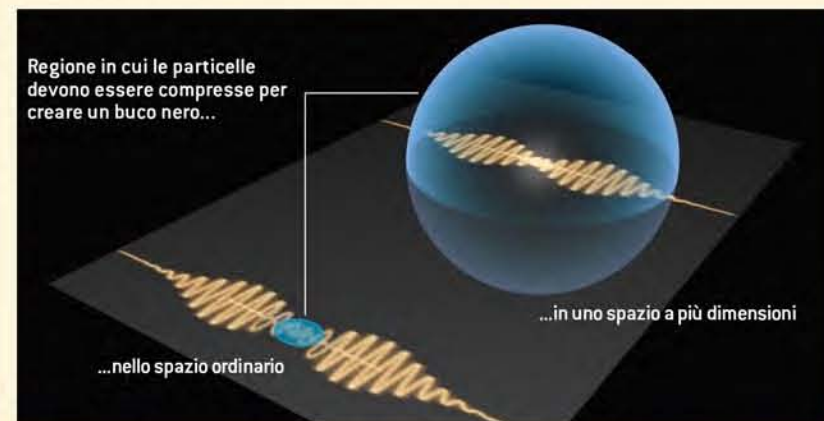
Questa maggior crescita della forza di gravità significa che l'effettiva scala di energie a cui le leggi della gravitazione e della meccanica quantistica collidono (ed è possibile creare buchi neri) potrebbe essere molto inferiore al suo valore tradizionale. Sebbene questa possibilità non sia ancora sostenuta da alcuna prova sperimentale, essa getta luce su numerosi problemi teorici. E, se è vera, la densità necessaria per creare buchi neri potrebbe rientrare nelle possibilità di LHC.

Lo studio teorico della produzione di buchi neri in collisioni ad alta energia risale al lavoro di Roger Penrose, dell'Università di Oxford, a metà degli anni settanta e di Peter D'Eath e Philip Norbert Payne, entrambi all'epoca a Cambridge, all'inizio degli anni novanta. La possibilità, di recente scoperta, di grandi dimensioni aggiuntive diede nuova vita a queste ricerche e spinse Tom Banks dell'Università della California a Santa Cruz e Willy Fischer dell'Università del Texas a darne una prima trattazione nel 1999.

In un workshop nel 2001 due gruppi – uno costituito da uno di noi (Giddings) e Scott Thomas della Stanford University, e l'altro da Savas Dimopoulos di Stanford e Greg Landsberg, della Brown University – descrissero indipendentemente che cosa si vedrebbe effettivamente facendo collidere particelle in impianti come LHC. Dopo un po' di calcoli rimanemmo senza parole. Le stime approssimative mostravano che negli scenari più ottimistici, corrispondenti ai minimi valori plausibili per la scala di

COME È DIFFICILE FARE BUCHI...

Che cosa serve per comprimere un pezzo di materia fino a trasformarlo in un buco nero? Più il corpo è leggero e più bisogna comprimerlo in modo che la gravità diventi tanto forte da farne un buco nero. I pianeti e gli esseri umani sono molto più lontani delle stelle dal diventare buchi neri (*grafico*). Per corpi microscopici, però, gli effetti quantistici si oppongono alla compressione. Le particelle non possono essere compresse fino a occupare una regione di spazio più piccola della loro lunghezza d'onda caratteristica (*diagramma*), il che fa ipotizzare che nessun buco nero possa essere più piccolo di 10^{-8} chilogrammi. Ma se lo spazio ha dimensioni aggiuntive la gravità sarebbe intrinsecamente più forte e non servirebbe comprimere un oggetto così tanto, dando agli aspiranti creatori di buchi neri una speranza di successo in un futuro non troppo lontano.

Don Dixon; Jana Brenning (*grafico*)

Planck, si potevano produrre buchi neri al ritmo di uno al secondo. I fisici chiamano *factory*, cioè «fabbrica», un acceleratore che produce particelle a questo ritmo: LHC perciò sarebbe una fabbrica di buchi neri.

L'evaporazione di questi buchi neri lascerebbe tracce molto caratteristiche sui rivelatori. Le collisioni più tipiche producono quantità moderate di particelle primarie, ma un buco nero in evaporazione è un'altra cosa. Secondo gli studi di Hawking, esso emette un gran numero di particelle di altissima energia in tutte le direzioni. I prodotti di decadimento comprendono tutti i tipi di particelle esistenti. Da allora, vari gruppi hanno condotto studi sempre più dettagliati alla ricerca delle firme caratteristiche che i buchi neri produrrebbero nei rivelatori dell'LHC.

Piovono buchi neri

L'idea di fabbricare buchi neri sulla Terra può sembrare una follia. Come si fa a sapere se decadrebbero tranquillamente, come prevede Hawking, o se continuerebbero a crescere fino a consumare l'intero pianeta? A prima vista, la prospettiva appare preoccupante, soprattutto dato che alcuni dettagli del ragionamento originario di Hawking possono non essere corretti: in particolare l'affermazione che l'informazione viene distrutta nei buchi neri. Ma in realtà il ragionamento quantistico generale dimostra che i buchi neri microscopici non possono essere stabili e perciò sono sicuri. Le concentrazioni di energia di massa, come le particelle elementari, sono stabili solo se una legge di conservazione ne proibisce il decadimento; tra gli esempi vi sono la conservazione della carica elettrica e del numero barionico (che, a meno di essere violata, garantisce la stabilità dei protoni). Non c'è un'analoga legge di conservazione che stabilizzi un piccolo buco nero. Nella teoria quantistica, tutto ciò che non è proibito è obbligatorio, e quindi i piccoli buchi neri decadono rapidamente, in accordo con il secondo principio della termodinamica.

Inoltre, un ragionamento empirico corrobora il fatto che le fabbriche di buchi neri non porrebbero alcun pericolo. Collisioni ad alte energie come quelle di LHC si sono già verificate: per esempio ai primordi dell'universo, ma anche adesso, quando raggi cosmici di energia sufficientemente alta colpiscono la nostra atmosfera. Così, se le collisioni alle energie di LHC possono creare buchi neri, la natura ne ha già creati sopra le nostre teste senza nuocerci. Secondo le prime stime di Giddings e Thomas, i raggi cosmici con le energie più elevate – protoni o nuclei atomici più pesanti con energie fino a 10^9 TeV – potrebbero produrre ogni anno fino a 100 buchi neri nell'atmosfera.

I due ricercatori hanno anche scoperto che le collisioni di neutrini cosmici potrebbero essere persino più produttive. Se le cose stanno così, il nuovo osservatorio Auger per i raggi cosmici in Argentina e l'osservatorio Fly's Eye in Utah aggiornato potrebbero riuscire a vedere numerosi buchi neri all'anno. Queste osservazioni, però, non escluderebbero la necessità degli esperimenti con gli acceleratori, che potrebbero generare un numero ancora maggiore di buchi neri in modo affidabile e in circostanze più controllate.

La produzione di buchi neri aprirebbe nuove prospettive alla fisica. La loro sola presenza dimostrerebbe l'esistenza delle dimensioni spaziali finora nascoste e, osservando le loro proprietà, i fisici potrebbero cominciare a esplorare la geografia di queste dimensioni. Per esempio, se gli acceleratori producessero buchi neri di massa via via maggiore, i buchi si addentrerebbero sempre di più nelle dimensioni aggiuntive e potrebbero diventare di grandezza comparabile a una o più di queste dimensioni, il che porterebbe a un mutamento spiccato nella dipendenza della temperatura dei buchi neri dalla massa. Analogamente, se un buco nero cresce abbastanza da intersecare un universo tridimensionale parallelo nelle dimensioni aggiuntive, le sue proprietà di decadimento cambierebbero improvvisamente.

La produzione di buchi neri negli acceleratori di particelle rappresenterebbe anche la conclusione di una delle aspirazioni storiche dell'umanità: comprendere la materia su scala sempre più piccola. Nell'ultimo secolo i fisici hanno fatto via via indietreggiare la frontiera del piccolo dai granelli di polvere agli atomi, ai protoni e neutroni, ai quark. Se sapranno creare buchi neri avranno raggiunto la scala di Planck, che si ritiene sia la minima lunghezza dotata di significato, la distanza limite al di sotto della quale le nozioni stesse di spazio e lunghezza probabilmente cessano di esistere.

Qualsiasi tentativo di indagare la possibile esistenza di distanze inferiori per mezzo di collisioni ad alta energia avrebbe come risultato la produzione di buchi neri. Collisioni a energie maggiori, anziché spezzare la materia in componenti più piccoli produrrebbero semplicemente buchi neri più grandi. Così, la comparsa dei buchi neri segnerebbe la fine di una delle strade della scienza. Al suo posto si aprirebbe la strada dell'esplorazione geografica delle dimensioni extra dello spazio.

Don Dixon

GRAZIE A BUCHI NERI DI MISURE DIFFERENTI si potranno forse sondare dimensioni aggiuntive che sono altrimenti inaccessibili. Dato che la gravità, a differenza di altre forze, si propaga in queste dimensioni, ciò vale anche per i buchi neri. I fisici ne varierebbero le misure regolando l'acceleratore di particelle su diverse energie. Se un buco nero intersecherà un universo parallelo, decadrà più velocemente e libererà meno energia (perché una parte di essa sarà assorbita dall'altro universo).

PER APPROFONDIRE

THORNE K.S., *Black Holes and Time Warps: Einstein's Outrageous Legacy*, W. W. Norton, 1995.

DIMOPOULOS S. e LANDSBERG G., *Black Holes at the LHC*, in «Physical Review Letters», Vol. 87, Paper n. 161602, 2001; preprint disponibile all'indirizzo arxiv.org/abs/hep-ph/0106295.

ANCHORDOQUI L.A., FENG J.L., GOLDBERG H. e SHAPERE A., *Black Holes from Cosmic Rays: Probes of Extra Dimensions and New Limits on TeV-Scale Gravity*, in «Physical Review D», Vol. 65, Paper n. 124027, 2002; arxiv.org/abs/hep-ph/0112247.

GIDDINGS S.B. e THOMAS S., *High Energy Colliders as Black Hole Factories: The End of Short Distance Physics*, in «Physical Review D», Vol. 65, Paper n. 056010, 2002; arxiv.org/abs/hep-ph/0106219.

GIDDINGS S.B., *Black Holes at Accelerators*, in *The Future of Theoretical Physics and Cosmology*, Gibbons G.W., Shellard E.P.S. e Rankin S.J. (*a cura*), Cambridge University Press, 2003; arxiv.org/abs/hep-th/0205027.

CARR B., *Primordial Black Holes*, in *The Future of Theoretical Physics and Cosmology*, Gibbons G.W., Shellard E.P.S. e Rankin S.J. (*a cura*), Cambridge University Press, 2003; astro-ph/0310838.

Gli esseri umani e alcuni animali condividono un'eredità di comportamenti economici, tra cui la cooperazione, lo scambio di favori reciproci e la rabbia nel trovarsi a corto di risorse

L'economia delle scimmie

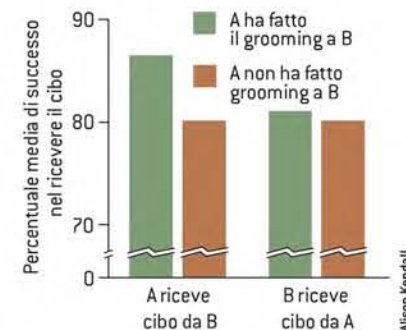
di Frans B.M. de Waal

Frans B.M. de Waal

Se decidessi di trasferirmi, la mia casa e il mio ufficio non resterebbero vuoti a lungo. Lo stesso accade in natura: le «proprietà immobiliari» cambiano inquilino di continuo. Le potenziali abitazioni vanno dai buchi scavati dai picchi alle conchiglie vuote sulla spiaggia. Un tipico esempio di ciò che gli economisti chiamano «catena dei posti vacanti» è il mercato immobiliare tra i paguri. Per proteggere il suo addome molle, il paguro si porta in giro la propria casa, di solito una conchiglia di gasteropode abbandonata. Il problema è che il paguro cresce, ma la sua casa no. Così i paguri sono sempre alla ricerca di nuove sistemazioni; appena si trasferiscono in una conchiglia più spaziosa, altri aspiranti si mettono in coda per quella rimasta libera. Si tratta di un caso evidente di domanda e offerta, ma poiché tutto si svolge su un piano piuttosto impersonale, pochi vedrebbero un collegamento tra le attività dei paguri e le transazioni economiche umane. Le interazioni del paguro risulterebbero più interessanti se si mettessero a contrattare, stringendo accordi del tipo «tu puoi avere la mia casa se io posso avere quel pesce morto». Ma i paguri non sono molto inclini alle trattative, e infatti non si fanno scrupolo di sfrattare gli inquilini con la forza. Tuttavia altri animali più sociali negoziano, e il loro approccio allo scambio di risorse e servizi ci aiuta a comprendere come e perché può essersi evoluto il comportamento economico umano.

LE SCIMMIE CAPPUCCINE si dividono il cibo proprio come gli scimpanzé e gli esseri umani. Questa pratica, rara tra altri primati, può essersi evoluta insieme alla caccia collettiva, una strategia utilizzata da tutte e tre le specie. In assenza di una ricompensa collettiva, la caccia di gruppo non esisterebbe. Nella foto, un giovane cappuccino mendica un po' di cibo avvicinando la mano a coppa a un maschio adulto che mangia.

Frans B.M. de Waal

Alison Kendall

FOOD FOR GROOMING. Gli scimpanzé condividono il cibo (nel caso della fotografia a fianco rami ricchi di foglie), in cambio di favori come il grooming. Questa reciprocità è stata dimostrata sperimentalmente registrando le sessioni di grooming le mattine dei giorni in cui erano programmati test di spartizione del cibo. Come mostra il grafico in alto, le probabilità che A ottenesse cibo da B aumentavano dopo che A aveva fatto il grooming a B, mentre il successo di B nell'ottenere cibo da A non era influenzato dal grooming di A. Dunque, è colui che effettua il grooming ad avvantaggiarsi in modo specifico: la regola è quindi quella dello scambio di cibo contro grooming.

Ricambiare un favore presuppone un atteggiamento simile a ciò che **gli umani chiamano «gratitudine»**

L'economia classica considera gli individui dei massimizzatori di profitto guidati da puro egoismo. Per dirla con le parole del filosofo inglese Thomas Hobbes, «si presume che ogni uomo persegua naturalmente ciò che è bene per lui stesso, e ciò che è giusto invece solo a beneficio della Pace, e in modo fortuito». In questa visione, tuttora predominante, la socialità non è che un'appendice, un «contratto sociale» che i nostri antenati stipularono per i vantaggi che presentava e non perché si sentissero reciprocamente attratti. Ma per il biologo questa ricostruzione immaginaria è quanto di più sbagliato si possa pensare. Noi discendiamo da una lunga linea di primati che vivevano in gruppo, e ciò significa che siamo naturalmente dotati di un forte desiderio di andare d'accordo e trovare partner con cui vivere e lavorare. Questa spiegazione evolutiva delle ragioni per cui interagiamo sta guadagnando credito grazie a una nuova linea di ricerca, nota come *behavioral economics*, o economia comportamentale, che si concentra sul comportamento umano reale, invece che sulle forze astratte del mercato, quale guida per comprendere i processi decisionali. Nel 2002 la scuola è stata ufficialmente riconosciuta con un premio Nobel condiviso da due dei suoi fondatori: Daniel Kahneman e Vernon L. Smith.

L'economia comportamentale animale è una disciplina giovane, che offre sostegno alle nuove teorie dimostrando che tendenze economiche e attività umane fondamentali, come la reciprocità, la divisione dei profitti e la cooperazione, non sono limitate alla nostra specie. Si sono probabilmente evolute in altri animali per le stesse ragioni per cui si sono evolute in noi: affinché gli individui traggano il massimo vantaggio l'uno dall'altro senza mettere in pericolo gli interessi comuni alla base della vita collettiva.

Prendiamo per esempio un fatto accaduto tempo fa durante le mie ricerche allo Yerkes National Primate Research Center di Atlanta. Avevamo insegnato alle scimmie cappuccine a raggiungere una ciotola di cibo su un vassoio tirando un'asta collegata al vassoio stesso. Rendendo il vassoio troppo pesante per un singolo individuo, abbiamo dato alle scimmie una ragione per collaborare. In un'occasione, il vassoio doveva essere tirato da due femmine, Bias e Sammy. Sedute in gabbie vicine, sono riuscite ad avvicinare un vassoio con sopra due ciotole di cibo. Sammy, tuttavia, era così smaniosa di ritirare la ricompensa da lasciar andare l'asta e afferrare la propria ciotola prima che Bias riuscisse a prendere la sua. Mentre Sammy masticava rumorosamente, Bias ebbe uno scatto d'ira. Gridò con tutto il fiato che aveva in gola per mezzo minuto fino a quando Sammy non riprese l'asta, aiutandola a riavvicinare il vassoio.

Sammy non agì a proprio vantaggio, dato che ormai la sua ciotola era vuota. Il comportamento correttivo di Sammy sembrò una risposta alla protesta di Bias contro la perdita di una ricompensa attesa. Questa azione si avvicina molto di più alle transazioni economiche umane di quanto non succeda con i paguri, poiché mostra cooperazione, comunicazione e la soddisfazione di un'aspettativa, forse persino il senso di aver contratto un obbligo. Sammy ha dimostrato di essere sensibile alla situazione di Bias, e questa sensibilità non sorprende se pensiamo che la vita di gruppo delle scimmie cappuccine si fonda sulla stessa miscela di cooperazione e competizione che caratterizza le nostre società.

In sintesi/*Economia evolutiva*

- Il nuovo campo dell'economia comportamentale considera il modo di fare affari degli esseri umani come un'eredità evolutiva della nostra specie.
- Sia lo scambio di beni e servizi nelle economie umane sia le interazioni tra gli animali sono influenzati dalla filosofia dell'«occhio per occhio» e dalle dinamiche di domanda e offerta.
- Le trattative di esseri umani e animali si basano su reazioni emotive, come l'indignazione nel caso di accordi non equi.
- Questa psicologia condivisa potrebbe spiegare alcuni peculiari comportamenti, come l'altruismo, in quanto parte del nostro background di primati collaborativi.

Che cos'è a far funzionare la reciprocità?

Esseri umani e animali si scambiano favori in molti modi, definiti tecnicamente meccanismi di reciprocità. A prescindere da quale sia il meccanismo, il filo conduttore è che il beneficio ricevuto ritorni in qualche modo al donatore iniziale.

MECCANISMO DI RECIPROCITÀ	CARATTERISTICHE PRINCIPALI
Simmetrico «Siamo amici»	L'affetto reciproco tra due individui provoca un comportamento simile in entrambe le direzioni senza che ci sia bisogno di tenere il conto del dare-avere quotidiano, finché la relazione resta soddisfacente. Si tratta forse del meccanismo di reciprocità più comune in natura, tipico degli esseri umani e degli scimpanzé nei rapporti più stretti. **Esempio:** gli scimpanzé amici si frequentano, praticano il grooming insieme e si aiutano reciprocamente nei combattimenti.
Attitudinale «Se sei gentile, sarò gentile»	Il comportamento di un individuo rispecchia quello dell'altro, con scambio di favori immediato. La reciprocità attitudinale immediata si verifica tra scimmie, e spesso gli esseri umani vi ricorrono nei rapporti con gli estranei. **Esempio:** le cappuccine spartiscono il cibo con chi le aiuta a tirare il vassoio che lo contiene.
Calcolato «Che cosa hai fatto per me ultimamente?»	Gli individui tengono il conto dei favori scambiati con determinati partner, in modo da decidere a chi restituire le cortesie. Questo meccanismo è tipico degli scimpanzé e comune tra esseri umani che intrattengono relazioni distanti o professionali. **Esempio:** gli scimpanzé sono premiati con una porzione di cibo da quelli a cui hanno precedentemente fatto il grooming.

Roberto Osti

L'evoluzione della reciprocità

Di tanto in tanto, animali e persone si aiutano l'un l'altro senza che chi presta aiuto ne tragga un chiaro vantaggio. Come può essersi evoluto un comportamento del genere? Se l'aiuto è diretto a un membro della famiglia, la risposta è relativamente semplice. «Il sangue non è acqua», si dice, e i biologi riconoscono i vantaggi genetici di una simile assistenza: se la nostra stirpe sopravvive, aumentano le probabilità che i nostri geni si tramandino alla generazione successiva. Ma la cooperazione tra individui non imparentati non suggerisce alcun vantaggio genetico immediato. Pëtr Kropotkin, uno dei fondatori del pensiero anarchico, propose una prima spiegazione nel suo libro *Il mutuo appoggio*, pubblicato nel 1902. Se la cooperazione ha carattere comunitario, scrisse, tutte le parti hanno la possibilità di trarne profitto: aumentano le probabilità di sopravvivenza di ognuno. È solo nel 1971, tuttavia, che Robert L. Trivers, allora alla Harvard University, formula la questione in termini evoluzionistici moderni con la sua teoria dell'altruismo reciproco.

Trivers sosteneva che vale la pena di compiere un sacrificio per qualcuno a patto che questi in seguito ricambi il favore. La reciprocità si ridurrebbe quindi a un «ti gratto la schiena, se tu gratti la mia». Questa tendenza a ripagarsi con la stessa moneta si riscontra anche negli animali? Le scimmie, antropomorfe e non, formano alleanze: due o più individui, per esempio, si coalizzano contro un terzo. E i ricercatori hanno scoperto una correlazione positiva tra la frequenza con cui A sostiene B e la frequenza con cui B sostiene A. Ma questo significa che gli animali tengono effettivamente il conto dei favori concessi e ricevuti? Più semplicemente, potrebbe darsi che dividano il mondo tra «amici», gli individui che preferiscono, e «non amici», quelli che sono loro indifferenti. Se i sentimenti sono ricambiati, i rapporti saranno o reciprocamente utili o reciprocamente inutili. Queste simmetrie possono spiegare la reciprocità riscontrata nei pesci, nei pipistrelli vampiri (che rigurgitano il sangue a favore dei propri amici), nei delfini e in molte scimmie.

Tim Laman, National Geographic Image Collection

Alison Kendall

CURARE LA CLIENTELA. A fianco, un pesce pulitore elimina i parassiti nella bocca di un grosso «cliente». Il pesce cliente nomade raramente torna da un pulitore che l'ha fatto aspettare (*a sinistra sul grafico*) o l'ha truffato mordendolo (*a destra sul grafico*). I pesci pulitori in genere trattano i clienti nomadi meglio dei residenti, poiché questi ultimi non possono scegliere le postazioni di pulizia. Proprio come negli esseri umani e in altri primati, il valore dei partner varia in relazione alla loro disponibilità.

Il fatto che questi animali forse non tengano un bilancio dei favori ricevuti non significa che non conoscano la reciprocità. La questione è piuttosto in che modo un favore fatto a qualcuno si traduca successivamente in un vantaggio. Che cos'è esattamente il meccanismo di reciprocità? Conservare un archivio mentale dei favori dati e ricevuti è solo uno dei modi per innescare la reciprocità, ed è ancora da dimostrare se gli animali se ne servono o meno. Finora gli scimpanzé sono la sola eccezione. Allo stato selvaggio, quando cacciano seguono la preda in gruppo, ma la cattura è effettuata da un singolo cacciatore, che poi divide il pasto con i compagni. Ma non tutti ricevono un pezzo della preda, e può persino accadere che il maschio di rango più elevato, se non ha partecipato alla caccia, debba supplicare invano. Questo suggerisce di per sé reciprocità: sembra che i cacciatori abbiano diritto di precedenza durante la divisione delle prede.

Per scoprire i meccanismi che sottostanno a questi comportamenti, abbiamo sfruttato la tendenza delle scimmie antropomorfe alla spartizione porgendo del cibo a uno degli scimpanzé della nostra colonia. Intorno al detentore della leccornia si formava subito un gruppo di spartizione, seguito da gruppi secondari attorno a individui che erano riusciti a ottenere una porzione maggiore, e così via, finché il cibo non era stato distribuito a tutti. Pretendere cibo altrui con la forza è una pratica assolutamente sconosciuta fra gli scimpanzé. I postulanti tendono la mano con il palmo rivolto verso l'alto, piagnucolano e gemono, ma le aggressioni sono rare. Qualunque sia il suo rango, chi ha il cibo ne controlla la distribuzione.

Abbiamo analizzato quasi 7000 di queste interazioni, confrontando l'atteggiamento del possessore verso specifici postulanti con i favori ricevuti in precedenza. Avevamo registrazioni dettagliate delle operazioni di *grooming* durante le mattine dei giorni in cui erano previsti i test. Se, per esempio, il maschio di rango più elevato, Socko, aveva fatto il grooming a May, le sue probabilità di ricevere cibo da quest'ultima nel pomeriggio aumentavano di molto. Questo legame tra passato e comportamento presente si è dimostrato generale, e non poteva essere spiegato da una simmetria nei rapporti, poiché il modello variava di giorno in giorno.

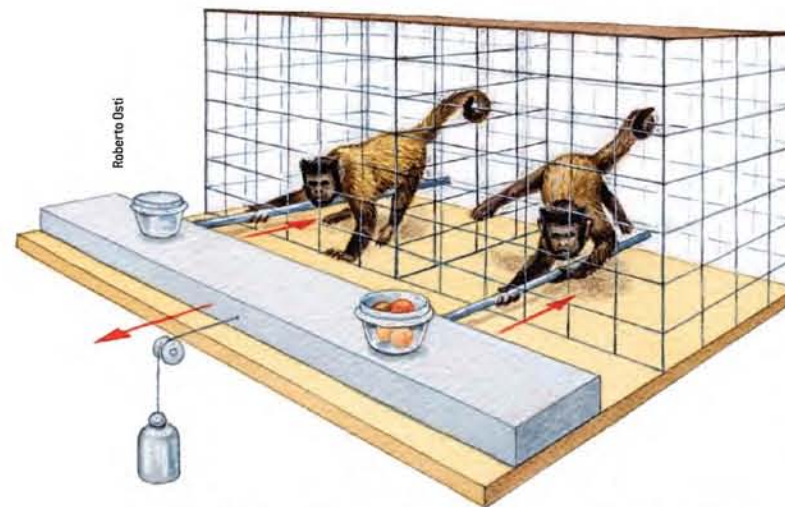
Il nostro è stato il primo studio sugli animali a dimostrare

S.P. Henzi

LE FEMMINE DI BABBUINO pagano un prezzo – in termini di grooming – per sbirciare un neonato; meno numerosi sono i piccoli, più lunga sarà la seduta di grooming richiesta. Il valore dei beni, nel caso specifico i piccoli di babbuino, aumenta al diminuire della loro disponibilità.

L'AUTORE

FRANS B.M. DE WAAL è C.H. Candler Professor di primatologia alla Emory University e direttore del Living Links Center presso lo Yerkes National Primate Research Center della stessa università. De Waal è specializzato nel comportamento sociale e cognitivo di scimmie, scimpanzé e bonobo, occupandosi in particolare di cooperazione, risoluzione dei conflitti e cultura. Ha scritto numerosi articoli scientifici e vari libri, tra cui, di prossima uscita, *Our Inner Ape*.

Roberto Osti

UN VASSOIO PER DUE. Il test dimostra che le cappuccine sono più propense a spartire il cibo con partner collaborativi. Per raggiungere il cibo, le due scimmie devono tirare a sé un vassoio servendosi di un'asta; il vassoio è troppo pesante per una scimmia sola. L'«aiutante» (*a sinistra*), la cui ciotola trasparente è vuota, lavora per il «vincitore», che spartirà il cibo con lui. Se ciò non avviene, l'aiutante smetterà di collaborare.

un nesso di dipendenza tra favori concessi e ricevuti. Questo meccanismo di reciprocità presuppone il ricordo di eventi precedenti e una tonalità del ricordo tale da indurre un comportamento amichevole. Nella nostra specie, questo processo è noto come «gratitudine», e non c'è ragione di chiamarlo in altro modo negli scimpanzé. Non è ancora chiaro se anche le antropomorfe provino il senso dell'obbligo morale, ma è interessante che la tendenza a ricambiare i favori non è la stessa per ogni tipo di rapporto. Tra soggetti che si frequentano spesso e praticano molto il grooming, una singola sessione di grooming ha poca importanza. Tra loro si svolgono scambi quotidiani, probabilmente senza che ne conservino memoria, e sembra invece che seguano il sistema di amicizie citato in precedenza. Solo nei rapporti più distanti il grooming si distingue come un comportamento che meriti una ricompensa specifica. Dato che Socko e May non sono amici intimi, il grooming di Socko è stato doverosamente registrato. Una differenza analoga è rilevabile nel comportamento umano: siamo più inclini a conservare la memoria dei favori scambiati con estranei e colleghi piuttosto che con i nostri migliori amici o con i familiari.

Mercati biologici

Poiché la reciprocità presuppone dei partner, la loro scelta è una questione centrale nell'economia comportamentale. La ricerca di alloggi abbandonati da parte dei paguri è estremamente semplice se confrontata con le interazioni tra i primati, che coinvolgono partner multipli che si scambiano valute diverse, come il grooming, il sesso, il sostegno nei combattimenti, il cibo, il babysitting e così via. Questo «mercato dei servizi» prevede che ogni individuo sia in buoni rapporti con quelli gerarchicamente più elevati al fine di promuovere le relazioni di grooming e, se è ambizioso, concludere affari con chi condivide i suoi obiettivi. I maschi degli scimpanzé formano alleanze per sfidare il dominante di turno, un'impresa gravida di rischi. Dopo un rovesciamento di potere, il nuovo maschio dominante ha bisogno di tener buoni i suoi sostenitori: un maschio alfa che cerchi di monopolizzare i privilegi del potere, come l'accesso alle femmine, difficilmente manterrà la posizione a lungo. E gli scimpanzé si comportano così anche senza aver letto Niccolò Machiavelli.

Quando ogni individuo cerca di conquistare i partner migliori e contemporaneamente mette in vendita i propri servizi, l'ambito in cui si estrinseca la reciprocità diventa quello della domanda e dell'offerta, che è precisamente ciò a cui si riferiscono Ronald Noë dell'Università Louis Pasteur di Strasburgo e Peter Hammerstein della Humboldt di Berlino con la loro teoria del mercato biologico. Questa teoria, applicabile in tutti i casi in cui i partner commerciali possono scegliere con chi trattare, afferma che il valore delle merci e dei partner varia in relazione alla loro disponibilità. Due studi sulle forze di mercato approfondiscono questa questione: uno riguarda il mercato dei piccoli tra i babbuini, l'altro le prestazioni professionali di pesciolini chiamati labridi pulitori.

Come tutte le femmine di primate, le femmine di babbuino sono irresistibilmente attratte dai piccoli: non solo dai propri, ma anche da quelli delle altre, che cercano di toccare emettendo grugniti amichevoli. Ma le madri sono superprotettive e riluttanti a lasciare che qualcuno si avvicini ai loro preziosi neonati. Per riuscirci, le femmine interessate fanno il grooming alla madre e ne approfittano per sbirciare il piccolo da sopra la sua spalla. Dopo una rilassante seduta di grooming, la madre potrebbe concedere uno sguardo più ravvicinato a chi ha eseguito il servizio, che in questo modo acquista il tempo del piccolo. Secondo la teoria del mercato, il valore dei piccoli aumenta se ce ne sono pochi in circolazione. In uno studio sui babbuini neri selvatici in Sudafrica, Louise Barrett dell'Università di Liverpool e Peter Henzi dell'Università del Central Lancashire, hanno scoperto che in caso di scarsità di neonati le madri potevano pretendere un prezzo più alto (sedute di grooming più lunghe) rispetto alle madri che si trovavano in una situazione di abbondanza di piccoli.

I labridi pulitori (*Labroides dimidiatus*) sono piccoli pesci marini che si nutrono dei parassiti esterni di pesci più grandi. Ogni pulitore ha una «postazione» su una scogliera dove i clienti vengono ad allargare le pinne pettorali e adottano posizioni che offrono al pulitore la possibilità di fare il suo lavoro. Questo scambio esemplifica un perfetto mutualismo. Il pulitore elimina i parassiti, mordicchiandoli, dalla superficie del corpo del cliente, dalle branchie e persino dall'interno della bocca. A volte il pulitore è così occupato che i clienti devono fare la fila. I pesci clienti si dividono in due tipologie: residenti e nomadi. I residenti appartengono alle specie con territori poco estesi: la loro unica scelta è andare dal pulitore locale. I nomadi, invece, o hanno a disposizione territori più estesi, oppure effettuano ampi spostamenti, per cui possono scegliere tra diverse postazioni di pulizia. Vogliono tempi di attesa brevi, un servizio eccellente e non sopportano «truffe», cioè che il pesce pulitore morda direttamente il cliente, anziché i parassiti.

Le ricerche sui labridi pulitori condotte da Redouan Bshary del Max-Planck-Institut di Seewiesen consistono principalmente in osservazioni sulle scogliere ma anche in ingegnosi esperimenti condotti in laboratorio. I suoi articoli sono molto simili a un manuale di buona prassi commerciale. I nomadi cambiano postazione con più facilità se un pulitore li ha ignorati troppo a lungo o se li ha truffati. I pulitori sembrano saperlo, e trattano i nomadi meglio dei residenti. Se un nomade e un residente arrivano contemporaneamente, il pulitore quasi sempre si occupa prima del

nomade. I residenti non hanno altro posto dove andare, così è possibile farli attendere. L'unica categoria di pesci che i pulitori non imbrogliano mai sono i predatori, la cui controstrategia radicale consiste nell'ingoiare il pulitore. Per usare le parole di Bshary, nei confronti dei predatori i pesci pulitori adottano saggiamente una «strategia di collaborazione incondizionata».

La teoria del mercato biologico offre un'elegante soluzione al problema dei profittatori, che ha a lungo preoccupato i biologi, dato che i sistemi di reciprocità sono ovviamente vulnerabili a chi prende piuttosto che dare. I teorici spesso suppongono che i trasgressori vengano puniti, anche se questo non è ancora stato dimostrato per gli animali. Ma i truffatori possono essere rimessi a posto in modo più semplice. Se ci sono più partner tra cui scegliere, basta abbandonare le relazioni insoddisfacenti e sostituirle con quelle che offrono più vantaggi. I meccanismi del mercato sono più che sufficienti a mettere al bando i profittatori. Anche nelle nostre società diffidiamo di chi prende più di quanto dia.

Quel che è giusto è giusto

Per godere dei vantaggi della cooperazione, un individuo deve soppesare i propri sforzi in relazione ad altri e confrontare la ricompensa ottenuta con lo sforzo effettuato. Per capire se gli animali seguano effettivamente questa strategia, ci siamo nuovamente rivolti alle nostre scimmie cappuccine, creando la condizione sperimentale di un mercato del lavoro in miniatura, ispirata da studi sul campo di cappuccine che attaccano scoiattoli giganti. La caccia allo scoiattolo è un impegno collettivo, ma prevede che tutte le ricompense finiscano nelle mani di un solo individuo: quello che effettua la cattura. Se i catturatori tenessero le prede per sé, è ovvio che gli altri perderebbero interesse nell'unirsi a loro. Le cappuccine si spartiscono la carne per lo stesso motivo per cui lo fanno gli scimpanzé (e gli esseri umani): non può esserci caccia di gruppo senza ricompensa collettiva.

Abbiamo riprodotto questa situazione in laboratorio assicurandoci che solo una delle due scimmie sottoposte al test del vassoio (il «vincitore») ricevesse una ciotola con pezzi di mela. Il suo partner (l'«aiutante») non aveva cibo nella propria ciotola, cosa evidente in partenza poiché le ciotole erano trasparenti. Eppure, l'aiutante tirava il vassoio a vantaggio del vincitore. Le scimmie sedevano fianco a fianco, separate da una rete. Da test precedenti sapevamo che i possessori di cibo possono trasportare cibo vicino alla rete consentendo al vicino di raggiungerlo attraverso la rete.

Abbiamo messo a confronto la manovra di recupero del vassoio sia in coppia sia individualmente. Nel primo caso, entrambi gli animali dovevano tirare un'asta e il vassoio era pesante; nell'altro, il vincitore maneggiava da solo un vassoio più leggero. Abbiamo contato più atti di spartizione di cibo dopo manovre collettive che non individuali: i vincitori ricompensavano i propri partner per l'assistenza ricevuta. Abbiamo inoltre confermato che la spartizione influenza la collaborazione futura. Dato che il tasso di successo di una coppia crollerebbe se il vincitore non spartisse, la ricompensa dell'aiutante si è rivelata una strategia intelligente.

Sarah F. Brosnan, una mia collega di Yerkes, si è spinta ancora più in là nell'esaminare le reazioni alle modalità di suddivisione delle ricompense. Offriva un sassolino a una scimmia, poi alzava una fetta di cetriolo in modo da invogliarla a restituire il sasso. Le scimmie afferravano rapidamente il principio di scambio. Messe fianco a fianco, due scimmie scambiavano volentieri i sassi con il cetriolo. Tuttavia, se una di loro otteneva dell'uva, che è molto più apprezzata, e l'altra solo il cetriolo, le cose prendevano una piega inattesa. Le scimmie che prima erano state pienamente disponibili a lavorare per il cetriolo, entravano improvvisamente in sciopero. Non solo erano restie a collaborare vedendo che l'altra faceva un affare migliore, ma iniziavano ad agitarsi, scagliando via i sassi, e a volte persino le fette di cetriolo: un cibo che in genere non è mai rifiutato era divenuto meno che desiderabile.

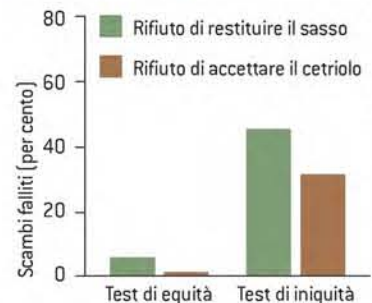
Rifiutare un compenso inadeguato – cosa che fanno anche gli esseri umani – è contrario alla logica dell'economia tradizionale. Se l'unica cosa che conta fosse la massimizzazione del profitto, si dovrebbe prendere ciò che si può senza lasciare interferire l'indignazione o l'invidia. Gli economisti comportamentali, d'altra parte, presuppongono che l'evoluzione abbia selezionato emozioni che preservano lo spirito di cooperazione e queste emozioni influenzino fortemente il comportamento. Nel breve termine, preoccuparsi di ciò che ricevono gli altri può sembrare irrazionale, ma nel lungo periodo fa sì che gli altri non approfittino di noi. Scoraggiare lo sfruttamento è fondamentale ai fini di una cooperazione continuativa.

Tuttavia tenere sempre sotto controllo il flusso di vantaggi e favori è difficile. Questo spiega perché gli esseri umani si proteggano da opportunisti e sfruttatori costruendo relazioni di amicizia con partner – come i coniugi e i buoni amici – che hanno superato la prova del tempo. Una volta che abbiamo stabilito di chi fidarci, tendiamo ad allentare le regole. Solo con partner più distanti conserviamo dei registri mentali e reagiamo pesantemente agli squilibri, definendoli «ingiusti».

Abbiamo trovato indizi di questi effetti della distanza sociale anche tra gli scimpanzé. Un «occhio per occhio» diretto, come abbiamo visto, è raro tra amici che si scambiano normalmente favori. Questo grado di rapporto sembra inoltre relativamente immune dall'iniquità. La Brosnan ha condotto la sua prova di scambio sia con gli scimpanzé sia con le scimmie cappuccine. La reazione più forte tra gli scimpanzé riguardava coloro che si conoscevano da un periodo relativamente breve, mentre i membri di una colonia che avevano vissuto insieme per più di trent'anni non manifestavano quasi nessuna reazione. Forse, maggiore è il loro grado di familiarità, più lungo è l'intervallo di tempo in base al quale gli scimpanzé valutano i propri rapporti. Solo quelli distanti sono sensibili alle fluttuazioni giornaliere.

Tutti gli agenti economici, siano essi umani o animali, si trovano ad affrontare il problema dell'opportunismo e la modalità di suddivisione dei profitti dopo sforzi congiunti. Lo fanno condividendo soprattutto con coloro che li hanno aiutati di più e manifestando forti reazioni emotive di fronte alle aspettative violate. Una disciplina economica realmente evoluzionista è consapevole di questa psicologia condivisa e considera la possibilità che noi ci comportiamo equamente non in modo fortuito, come pensava Hobbes, ma come conseguenza del nostro background di primati collaborativi.

LE SCIMMIE CAPPUCCINE HANNO PREFERENZE SPECIFICHE in fatto di cibo: per esempio preferiscono la frutta alla verdura. Addestrate a scambiare un sasso con una fetta di cetriolo, hanno continuato tranquillamente a farlo finché anche la scimmia che si trovava nella camera adiacente riceveva del cetriolo (test di equità, *nel grafico*). Ma quando a una cappuccina veniva data dell'uva mentre la vicina continuava a ricevere del cetriolo (test di iniquità), quest'ultima protestava per la «ingiusta ricompensa», o rifiutando di accettare il cetriolo, a volte persino gettandolo fuori dalla gabbia, oppure rifiutando di restituire il sasso.

Frans B.M. de Waal (*foto*); Alison Kendall (*grafico*)

PER APPROFONDIRE

DE WAAL F.B.M., *The Chimpanzee's Service Economy: Food for Grooming*, in «Evolution and Human Behavior», Vol. 18, n. 6, pp. 375-386, 1997.

DE WAAL F.B.M. e BERGER M.L., *Payment for Labour in Monkeys*, in «Nature», Vol. 404, p. 563, 6 aprile 2000.

BSHARY R. e SCHÄFFER D., *Choosy Reef Fish Select Cleaner Fish That Provide High-Quality Service*, in «Animal Behaviour», Vol. 63, n. 3, pp. 557-564, marzo 2002.

HENZI S.P. e BARRETT L., *Infants as a Commodity in a Baboon Market*, in «Animal Behaviour», Vol. 63, n. 5, pp. 915-921, 2002.

L'economia degli umani

Le emozioni descritte in queste pagine da Frans de Waal a proposito degli scambi economici fra animali sociali trovano un parallelo nelle nostre transazioni. Queste somiglianze suggeriscono che le interazioni economiche umane siano controllate almeno in parte da emozioni e orientamenti arcaici. In effetti, il lavoro animale è alla base di una linea di ricerca in pieno sviluppo, nota come economia comportamentale. Questa nuova disciplina sta sfidando, e modificando, il «modello standard» della ricerca economica, secondo cui gli esseri umani basano le scelte economiche su processi di pensiero razionali. Per esempio, le persone rifiutano offerte che considerano ingiuste, mentre l'economia classica sostiene che gli individui prendono tutto ciò che possono. Nel 2002 il premio Nobel per l'economia è andato a due pionieri del campo: Daniel Kahneman, psicologo alla Princeton University, e Vernon L. Smith, economista alla George Mason University.

Kahneman, insieme al collega Amos Tversky, mancato nel 1996, aveva analizzato il modo in cui gli esseri umani effettuano una scelta quando sono alle prese con l'incertezza e il rischio. Gli economisti classici avevano pensato alle decisioni umane in termini di vantaggio atteso: la somma dei profitti che le persone si aspettano di ricavare da un evento futuro moltiplicata per la sua probabilità di accadere. Ma Kahneman e Tversky dimostrarono che le persone sono molto più spaventate dalle perdite di quanto siano attratte da potenziali profitti, e che in genere seguono il gregge. L'esplosione della bolla speculativa del mercato azionario del 2000 è un potente esempio: il desiderio di comportarsi come gli altri può aver portato gli investitori a pagare le azioni molto di più di quanto avrebbe fatto un agente puramente razionale.

Il lavoro di Smith ha dimostrato che gli esperimenti di laboratorio potrebbero funzionare anche in economia, tradizionalmente considerata una scienza non sperimentale basata esclusivamente sull'osservazione. Tra le sue scoperte in laboratorio: le decisioni emotive non sono necessariamente scriteriate.

Jim Sugar/Corbis

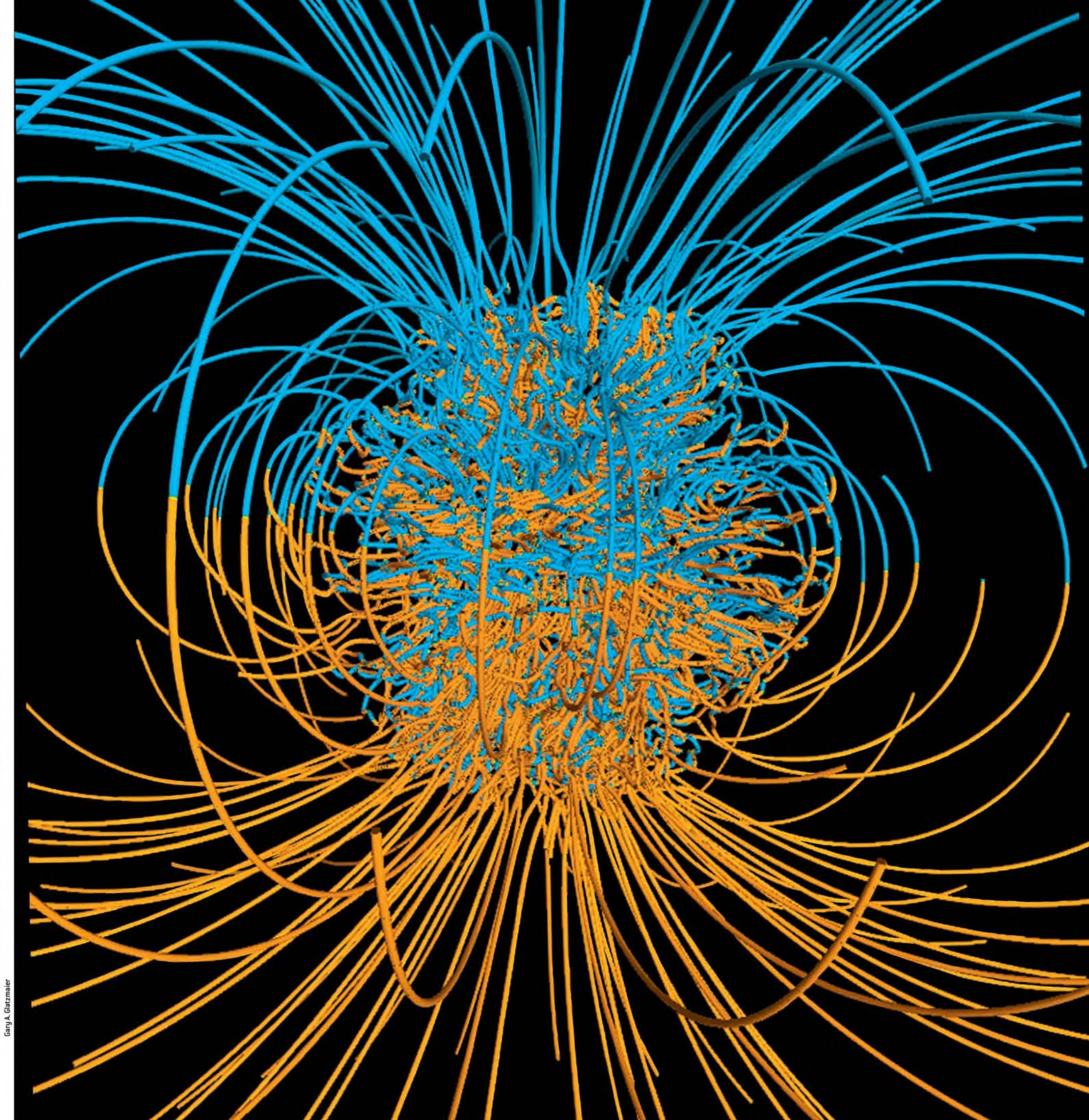
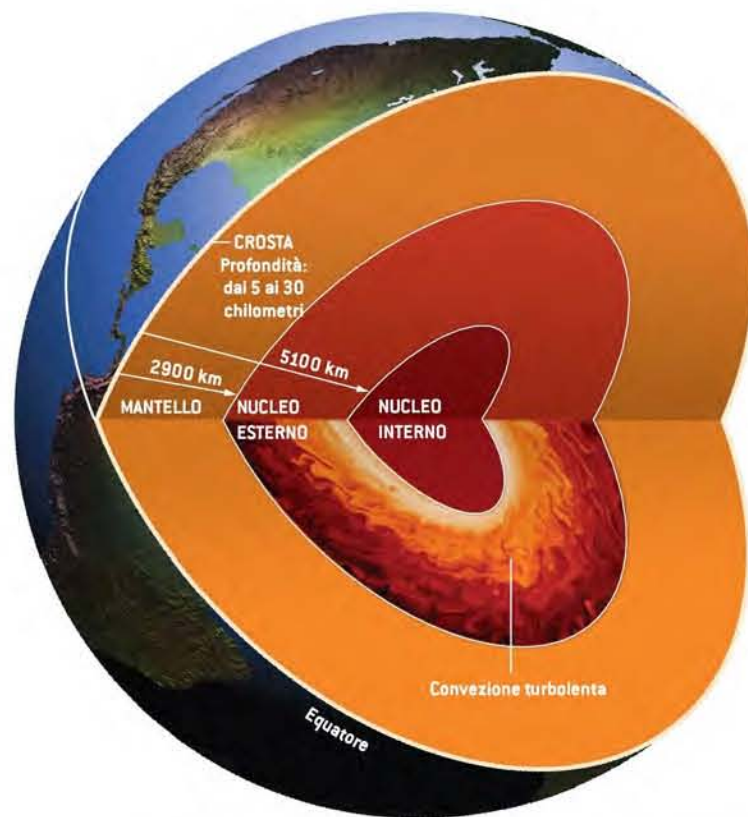
GLI AGENTI DI BORSA possono essere travolti da ondate di irrazionalità.

I misteri della dinamo terrestre

La polarità del campo magnetico terrestre di tanto in tanto si inverte: recenti studi sull'interno del nostro pianeta offrono affascinanti indizi del possibile esordio di un nuovo ribaltamento

di Gary A. Glatzmaier e Peter Olson

La maggior parte di noi dà per scontato che le bussole puntino vero nord. Del resto, i marinai basano la loro navigazione sul campo magnetico terrestre da centinaia di anni, per non parlare degli uccelli e degli altri animali sensibili ai campi magnetici che fanno la stessa cosa da tempi incomparabilmente più lunghi. I poli magnetici del pianeta, però, non sono sempre stati orientati come oggi. Rimasti bloccati quando si è consolidata la roccia, i minerali ferromagnetici inclusi nelle rocce magmatiche testimoniano infatti, a mo' di minuscoli aghi di bussola, che il campo magnetico terrestre ha assunto orientamenti assai diversi nel corso dei tempi geologici, e rivelano che si è invertito centinaia di volte nei quattro miliardi e mezzo di anni di vita del pianeta. Ma un'inversione di campo magnetico non si verifica ormai da 780.000 anni, vale a dire da un tempo notevolmente più lungo di quello che intercorre mediamente tra un'inversione e l'altra, che è di circa 250.000 anni. Per di più, il campo geomagnetico primario è diminuito quasi del 10 per cento da quando fu misurato per la prima volta negli anni trenta del XIX secolo. Ciò significa che sta declinando circa 20 volte più rapidamente di ciò che farebbe se perdesse la propria fonte di energia. È forse in arrivo un'altra inversione?

GROVIGLI CENTRALI. Le linee di forza del campo magnetico evidenziate da una simulazione al computer mostrano che il campo magnetico terrestre è molto più semplice all'esterno del pianeta che all'interno. In superficie, la parte principale del campo esce (*tubi gialli*) vicino al Polo sud ed entra (*tubi blu*) in prossimità del Polo nord.

Gary A. Glatzmaier

IL MOTORE DELLA DINAMO. Tra gli strati che compongono l'interno della Terra vi è il nucleo esterno liquido, in cui la complessa circolazione generata da una convezione turbolenta genera il campo geomagnetico.

I geofisici sanno da tempo che la sorgente di questo campo magnetico fluttuante si trova al centro della Terra. Il nostro pianeta, infatti, come molti altri corpi del sistema solare, genera il proprio campo magnetico per mezzo di una dinamo interna. In linea di principio, la dinamo terrestre funziona come un normale generatore elettrico, producendo campi elettrici e magnetici grazie all'energia cinetica delle sue parti in movimento. In un generatore, le parti in movimento sono bobine di filo in rotazione; in un pianeta o in una stella il movimento avviene invece all'interno di un fluido elettricamente conduttivo. Nel nucleo terrestre circola un oceano di ferro fuso di volume pari a oltre sei volte la Luna, che costituisce la cosiddetta geodinamo.

Fino a poco tempo fa, gli scienziati spiegavano la geodinamo e i suoi misteri magnetici basandosi soprattutto sulla teoria, ma negli ultimi dieci anni sono stati sviluppati metodi innovativi per esplorare in dettaglio i meccanismi della geodinamo. I satelliti artificiali stanno offrendo immagini dettagliate del campo geomagnetico alla superficie terrestre, e nuove strategie per simulare al computer il comportamento di dinamo simili a quella terrestre e mettere a punto modelli fisici stanno aiutando a spiegare i dati dei satelliti. Da queste ricerche sta emergendo una spiegazione affascinante di come si sono verificate le inversioni di polarità del passato e indizi su come potrebbe iniziare il prossimo ribaltamento.

In sintesi/*Inversioni ricorrenti*

- La documentazione geologica rivela che il campo magnetico primario della Terra inverte la propria polarità piuttosto spesso, e i ricercatori si chiedono da tempo in che modo ciò possa avvenire.
- Modelli computerizzati del movimento fluido nel nucleo fuso della Terra hanno simulato un campo magnetico di tipo terrestre e le sue inversioni di polarità. Ma dato che il movimento del fluido nei modelli è molto più semplice degli andamenti turbolenti all'interno della Terra, non è chiaro quanto queste scoperte rispecchino la realtà.
- Modelli tridimensionali in grado di simulare la turbolenza risolveranno prima o poi questa incertezza. Nel frattempo, le mappe satellitari del campo magnetico e gli esperimenti sulla convezione stanno offrendo nuovi elementi per approfondire la nostra comprensione della geodinamo.

Che cosa aziona la dinamo?

Prima di cercare di capire come avvengono le inversioni del campo magnetico, è utile considerare che cosa aziona la geodinamo. Già negli anni quaranta i fisici avevano capito che per generare il campo magnetico di qualunque pianeta sono necessarie tre condizioni di base. La prima è la presenza di un grande volume di fluido elettricamente conduttivo, come il nucleo esterno liquido della Terra, ricco di ferro. Questo strato circonda un nucleo interno solido di ferro pressoché puro situato sotto i 2900 chilometri di solida roccia che formano il voluminoso mantello e la sottile crosta dei continenti e dei pavimenti oceanici. Il carico della crosta e del mantello sottopone il nucleo a pressioni due milioni di volte superiori a quelle in superficie. Le temperature del nucleo sono altrettanto estreme: circa 5000 gradi, un valore paragonabile alla temperatura alla superficie del Sole.

Queste condizioni ambientali pongono le premesse per il secondo requisito delle dinamo planetarie: la presenza di una fonte di energia che mantenga il fluido in movimento. L'energia che aziona la geodinamo è in parte termica e in parte chimica: entrambe queste forme di energia generano spinte di galleggiamento nelle profondità del nucleo. Come in una pentola di minestrone che bolle su un fornello, il nucleo è più caldo sul fondo che alla sommità.

Ciò significa che il ferro più caldo e meno denso presente nella parte inferiore del nucleo tende a risalire verso l'alto. Quando il fluido raggiunge la parte più esterna del nucleo, cede parte del suo calore al mantello sovrastante. Il ferro liquido si raffredda, divenendo meno denso del mezzo circostante, e affonda. Questo processo di trasferimento del calore dal fondo del nucleo alla sua sommità per mezzo della risalita e dell'affondamento di fluido è detto di convezione termica.

Negli anni sessanta, Stanislaw Braginsky ipotizzò che il calore, sfuggendo dal nucleo superiore, provocasse anche una dilatazione del nucleo interno solido, producendo due ulteriori fattori di spinta di galleggiamento in grado di azionare il meccanismo di convezione. Via via che ferro liquido si solidifica in cristalli sull'esterno del nucleo interno solido, viene liberato calore latente di condensazione, che contribuisce alla spinta idrostatica di origine termica. Inoltre composti chimici meno densi, come solfuro di ferro e ossido di ferro, sono segregati dai cristalli del nucleo interno e risalgono attraverso il nucleo esterno, contribuendo alla convezione.

Ma per far sì che in un pianeta generi un campo magnetico in grado di autosostenersi è necessario un terzo fattore: la rotazione. Con l'effetto di Coriolis, la rotazione terrestre provoca la deviazione dei fluidi in risalita all'interno del nucleo, allo stesso modo in cui torce le correnti oceaniche e le tempeste tropicali nelle configurazioni a spirale che vediamo nelle immagini da satellite. Nel nucleo, le forze di Coriolis deviano il fluido in risalita lungo percorsi elicoidali, come se il fluido seguisse la spirale di una molla.

Il fatto che la Terra abbia un nucleo liquido ricco di ferro, energia sufficiente a mantenere la convezione e una forza di Coriolis in grado di deflettere la traiettoria del fluido in convezione spiega come ha fatto la dinamo a sostenersi per milioni di anni. Ma servono ulteriori elementi per rispondere alle domande sul campo magnetico generato dalla dinamo, e sulla ragione delle sue inversioni di polarità.

Mappe del campo magnetico

Una scoperta di grande interesse è stata fatta negli ultimi cinque anni, quando si sono potute confrontare mappe precise del campo geomagnetico ottenute a distanza di vent'anni. Il satellite Magsat ha misurato il campo geomagnetico al di sopra della superficie terrestre nel 1980; un secondo satellite – Oersted – ha fatto lo stesso dal 1999 (*si veda l'illustrazione a p. 79*). I ricercatori hanno estrapolato matematicamente queste misurazioni da satellite fino alla sommità del nucleo, assumendo che le correnti elettriche del mantello terrestre fossero trascurabili. Il confine tra nucleo e mantello è quanto di più vicino si possa studiare al campo magnetico molto più intenso e complesso che esiste all'interno del nucleo, dove le fluttuazioni magnetiche hanno origine; le forti correnti elettriche presenti nel nucleo impediscono misure dirette del campo magnetico in quella sede. A dispetto dei limiti intrinseci di questo metodo, sono però emerse diverse osservazioni degne di nota, tra cui alcuni indizi del possibile esordio di una nuova inversione di polarità.

È stato importante scoprire che prevalentemente il campo geomagnetico ha origine in corrispondenza di quattro ampie regioni del confine nucleo-mantello. Per quanto la geodinamo produca un campo magnetico molto intenso, solo l'uno per cento circa dell'energia del campo magnetico si estende al di fuori del nucleo. Quando la si misura alla superficie, la struttura dominante di questo campo è un dipolo, quasi sempre allineato, approssimativamente, con l'asse di rotazione terrestre. Come una semplice calamita, questo flusso magnetico primario del campo è diretto fuori del nucleo nell'emisfero meridionale e verso il nucleo nell'emisfero settentrionale. (Gli aghi delle bussole puntano verso il Polo nord geografico in quanto il Polo sud magnetico del dipolo giace in prossimità di esso.)

Ma i satelliti hanno rivelato che il flusso non è distribuito uniformemente in tutto il globo. Al contrario, la maggior parte dell'intensità complessiva del campo di dipolo ha origine al di sotto del Nord America, della Siberia e della costa dell'Antartide. I ricercatori sospettano che un'instabilità ancora sconosciuta all'interno del nucleo sia responsabile del mantenimento di grandi aree di flusso magnetico normale. È possibile che questa sia la causa delle inversioni di dipolo? Gli elementi che emergono dalle testimonianze geologiche mostrano che le inversioni del passato si sono verificate su periodi relativamente brevi, più o meno da 4000 a 10.000 anni. Se la geodinamo si arrestasse, il dipolo impiegherebbe quasi 100.000 anni a scomparire spontaneamente. Una transizione così rapida comporta che qualche genere di instabilità distrugga la polarità originaria generando la nuova.

Nel caso di singole inversioni, questa misteriosa instabilità è probabilmente dovuta a qualche tipo di cambiamento caotico nella struttura del flusso che solo occasionalmente riesce a invertire il dipolo globale. Ma la frequenza delle inversioni, che è andata aumentando regolarmente negli ultimi 120 milioni di anni (*si veda l'illustrazione a p. 81*), può avere un controllo esterno. Per esempio, un cambiamento della temperatura sul fondo del mantello, che potrebbe costringere il nucleo a cambiare l'andamento dei suoi movimenti convettivi di risalita.

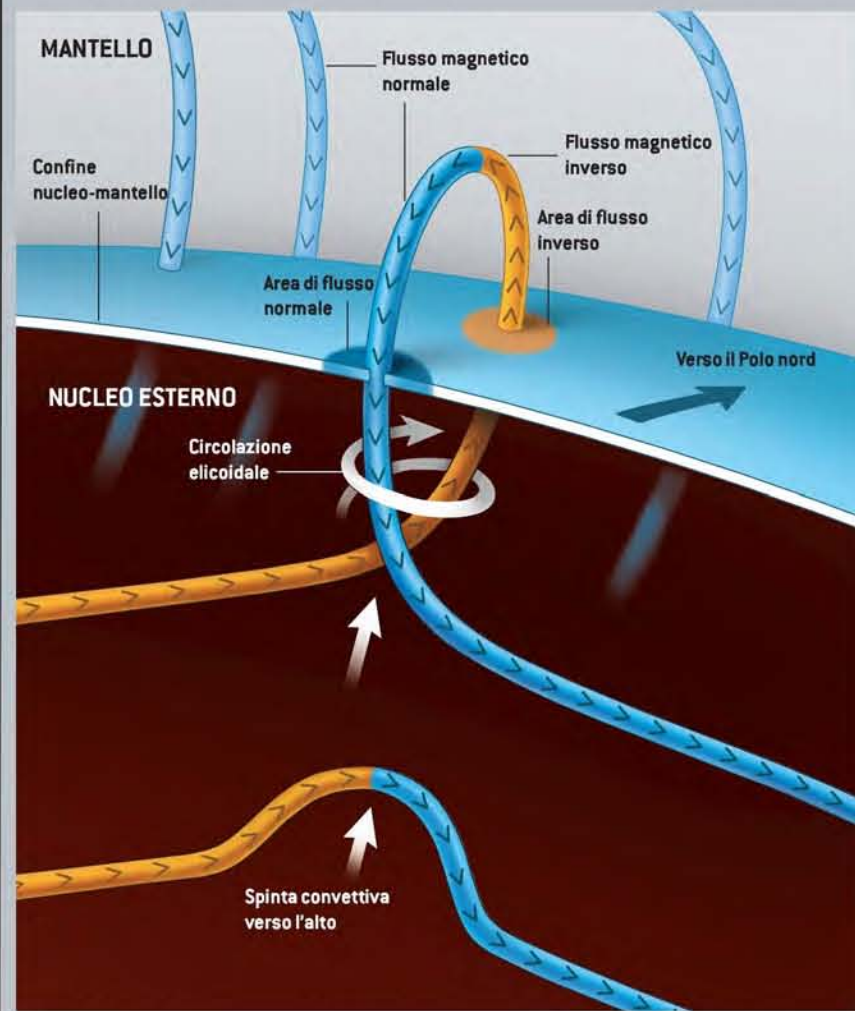
I sintomi di un possibile cambiamento in grado di indurre l'inversione sono emersi quando un altro gruppo di scienziati ha analizzato le mappe satellitari di Magsat e di Oersted. Gauthier Hulot e i suoi colleghi all'Istituto geofisico di Parigi hanno notato che variazioni sostenute del campo geomagnetico provengono da siti al confine tra nucleo e mantello in cui la direzione del flusso è opposta a quella normale per quell'emisfero. La più grande di queste cosiddette aree di flusso inverso si estende verso ovest dalla punta meridionale dell'Africa fino all'estremità meridio-

Gary A. Glatzmaier

TROPPO DIFFICILE PER I COMPUTER. I complessi andamenti del flusso nel nucleo liquido esterno della Terra somigliano a simulazioni bidimensionali di convezioni turbolente (*a sinistra*). Le simulazioni tridimensionali della geodinamo, tuttavia, limitano le ricerche allo studio dei pennacchi a grande scala tipici del flusso laminare (*a destra*). I computer, almeno finora, non riescono a risolvere i calcoli assai più complicati associati al flusso turbolento tridimensionale nel centro del pianeta.

FLUSSO MAGNETICO A MACCHIE

Le regioni in cui la direzione del flusso magnetico è opposta a quella del resto dell'emisfero si creano occasionalmente quando al di sopra del nucleo terrestre emergono campi magnetici ritorti. Queste aree di flusso inverso possono indebolire la componente principale del campo magnetico alla superficie terrestre, la componente di dipolo, e perfino segnalare l'esordio di un'inversione globale di polarità. Le aree di flusso inverso si formano quando il fluido che risale attraverso il nucleo esterno fuso spinge verso l'alto linee di campo magnetico approssimativamente orizzontali all'interno del nucleo. A volte questa spinta convettiva curva una linea fino a formare un arco (*a*). Contemporaneamente, la rotazione terrestre produce una circolazione elicoidale del fluido liquido che trasforma l'arco in un cappio (*b*). Quando la spinta verso l'alto è abbastanza forte da far uscire il cappio dal nucleo, sul confine tra nucleo e mantello si forma una coppia di aree di flusso.

Jen Christiansen

GLI AUTORI

GARY A. GLATZMAIER e PETER OLSON sviluppano modelli computerizzati per lo studio della struttura e la dinamica dell'interno di pianeti e stelle. A metà degli anni novanta, Glatzmaier ha elaborato la prima simulazione di geodinamo che produceva un'inversione spontanea del dipolo magnetico; dal 1998 insegna al Dipartimento di scienze della Terra dell'Università della California a Santa Cruz. Olson studia le interazioni tra nucleo e mantello terrestre che producono campi geomagnetici, la tettonica delle zolle e i pennacchi di mantello profondo. Lavora al Dipartimento di scienze della Terra e planetarie della Johns Hopkins University dal 1978.

nale del Sud America. In questa «macchia», il flusso magnetico è rivolto verso l'interno, cioè verso il nucleo, mentre la maggior parte del flusso nell'emisfero meridionale è diretta verso l'esterno.

Una delle conclusioni più significative tratte dal confronto tra le misure di Oersted e quelle del 1980 è stato che al confine nucleo-mantello continuano a formarsi nuove aree di flusso inverso, per esempio sotto la costa orientale del Nord America e sotto l'Artico. Inoltre, le macchie più vecchie si sono ingrandite e spostate leggermente verso i poli. Alla fine degli anni ottanta, usando mappe del campo magnetico più rozze e datate, David Gubbins dell'Università di Leeds osservò che la proliferazione, la crescita e la migrazione verso i poli di queste aree di flusso inverso spiegavano il declino storico del dipolo.

Queste osservazioni possono essere spiegate fisicamente usando il concetto di linee di forza magnetiche (in realtà, il campo è continuo nello spazio). Possiamo immaginare queste linee di forza come se fossero «congelate» nel nucleo di ferro fluido, e tendessero perciò a seguirne il movimento. Nel nucleo della Terra, a causa dell'effetto di Coriolis, i gorghi e i vortici presenti nel fluido ritorcono le linee di forza del campo magnetico in fasci. Ciascuna torsione impacca più linee di forza nel nucleo, incrementando l'energia nel campo magnetico.

Le aree di flusso magnetico si formano sul confine tra nucleo e mantello quando gorghi e vortici interagiscono con campi magnetici diretti da est a ovest, descritti come toroidali, che sono immersi entro il nucleo. Questi movimenti turbolenti di fluido possono deflettere e torcere le linee toroidali in andamenti a cappio detti campi poloidali, che hanno un'orientamento nord-sud. Talvolta la deflessione è causata dalla risalita del fluido. Se la risalita è abbastanza intensa, la sommità del cappio poloidale fuoriesce dal nucleo (*si veda il box qui a fianco*). E questo fenomeno crea una coppia di aree di flusso in cui le estremità del cappio attraversano il confine tra nucleo e mantello. Una di queste aree ha un flusso diretto normalmente (nella stessa direzione del campo complessivo di dipolo in quell'emisfero); l'altra presenta il flusso opposto, o inverso.

Quando la torsione fa sì che l'area di flusso inverso si trovi più vicino al polo geografico di quella di flusso normale, il risultato è un indebolimento del dipolo, che è più sensibile ai cambiamenti in prossimità dei suoi poli. Di fatto, ciò descrive la situazione attuale, in cui l'area di flusso inverso è al di sotto dell'estremità meridionale del continente africano. Perché si verifichi un'inversione di polarità su scala planetaria, quell'area dovrebbe estendersi fino ad abbracciare l'intera regione polare; al tempo stesso, un simile cambiamento della polarità magnetica regionale complessiva dovrebbe verificarsi nelle vicinanze dell'altro polo geografico.

Simulazioni al supercomputer

Per studiare più a fondo il modo in cui si sviluppano le aree di flusso inverso e come possano segnalare l'esordio della prossima inversione di polarità, i ricercatori simulano la geodinamo in modelli al supercomputer e in esperimenti di laboratorio. L'era delle simulazioni al computer della dinamo è iniziata nel 1995, quando tre gruppi – Akira Kageyama dell'Università di Tokyo e i suoi collaboratori; Paul H. Roberts dell'Università della California a Los Angeles, e uno di noi (Glatzmaier); Chris Jones dell'Università di Exeter in Inghilterra e i suoi colleghi – svilupparono indipendentemente simulazioni numeriche che generavano campi magnetici simili a quello alla superficie terrestre. Da allora, simulazioni corrispondenti a un'evoluzione di centinaia di migliaia di anni hanno dimostrato in che modo la convezione possa effettivamente produrre aree di flusso magnetico inverso sul confine tra nucleo e mantello, proprio come quelle che si osservano nelle immagini da satellite. Spesso queste aree compaiono prima di un'inversione spontanea del dipolo magnetico, che alcune simulazioni possono anche riprodurre.

Le inversioni di polarità generate al computer hanno offerto ai ricercatori una prima rudimentale idea di come hanno origine e si sviluppano questi mutamenti (*si veda il box a p. 80*). Una simulazione tridimensionale – eseguita per dodici ore al giorno, ogni giorno, per oltre un anno, per simulare 300.000 anni di evoluzione terrestre – presentava l'inizio di un'inversione come diminuzione di intensità del campo di dipolo. Cominciavano poi ad apparire numerose aree di flusso magnetico inverso, come quelle attualmente in fase di formazione sul confine tra nucleo e mantello, ma anziché estinguere completamente il campo magnetico queste aree creavano un campo debole con una complessa mescolanza di polarità durante la transizione. Vista alla superficie del modello, l'inversione del dipolo si verificava quando le aree di flusso inverso cominciavano a dominare la polarità originale al confine tra nucleo e mantello. In totale, ci volevano circa 9000 anni perché la vecchia polarità si dissipasse e la nuova prendesse il controllo di tutto il nucleo terrestre.

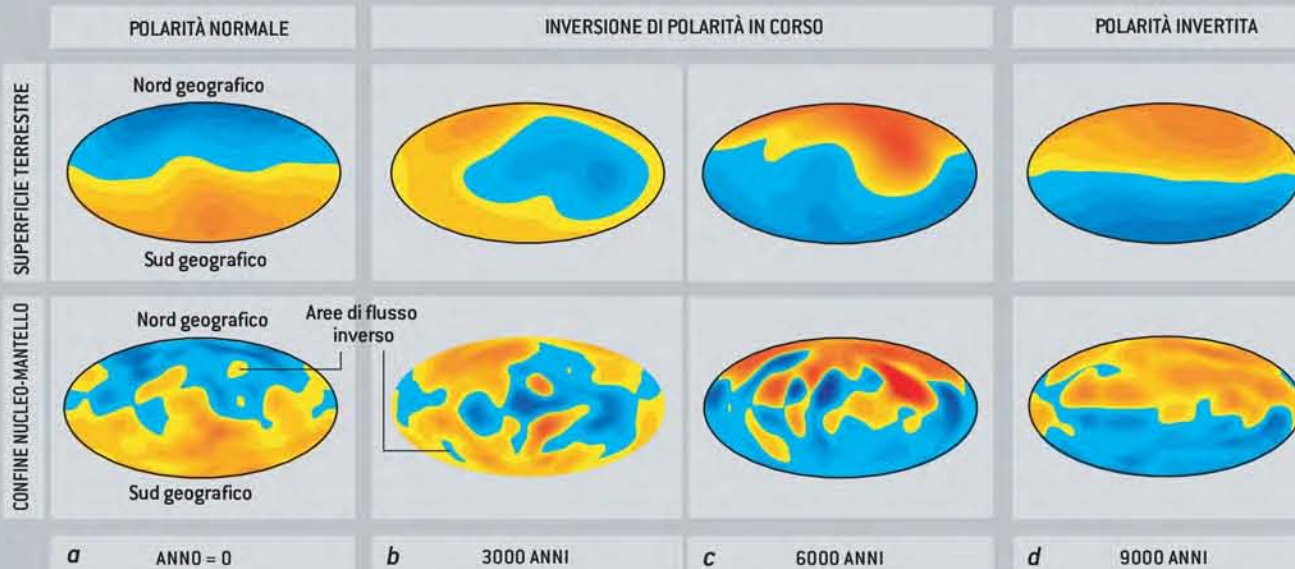
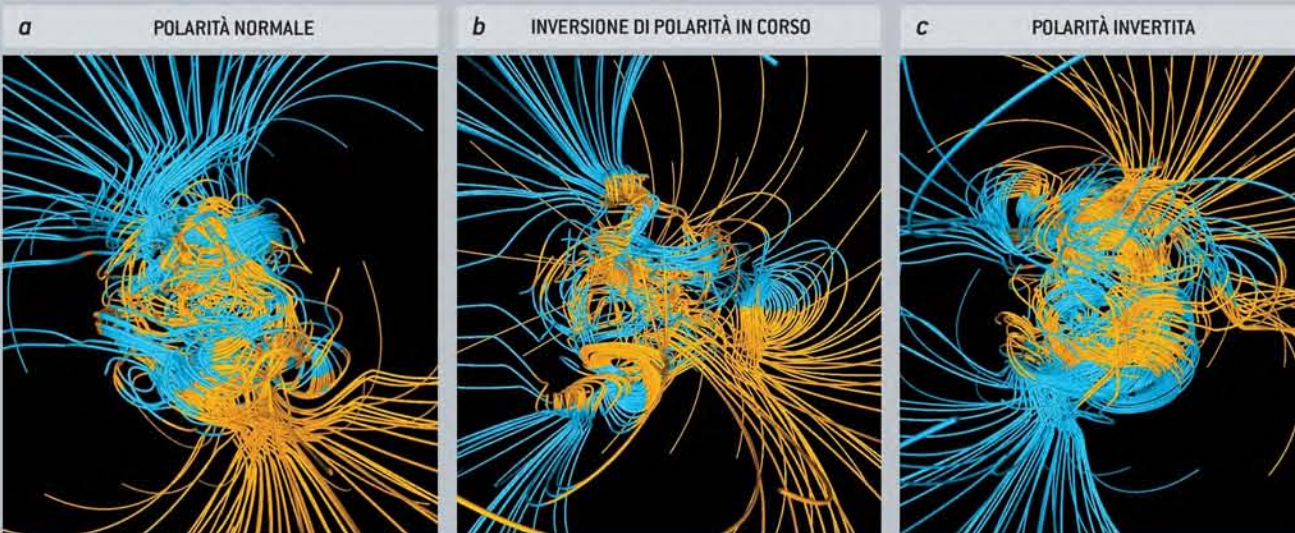
Basandosi in parte su questi successi, i modelli computerizzati della dinamo si stanno rapidamente moltiplicando. Attualmente, oltre una decina di gruppi in tutto il mondo li sta usando per migliorare la comprensione dei campi magnetici presenti nei corpi celesti del sistema solare e oltre. Ma qual è il grado di verosimiglianza con cui questi modelli riescono a descrivere la dinamo reale all'interno della Terra?

Nessun modello è ancora riuscito a simulare l'ampio spettro di turbolenza che si trova all'interno di un pianeta, principalmente perché neanche i supercomputer paralleli sono abbastanza veloci da simulare con precisione la turbolenza magnetica in tre dimensioni con parametri fisici realistici. I più piccoli tra i gorghi e i vor-

Peter Olsen/ Gauthier Hulot/Nature

ANOMALIE IN CRESCITA. Le isolinee del campo magnetico terrestre, estrapolate fino al confine nucleo-mantello dalle misurazioni da satellite, mostrano che la maggior parte del flusso magnetico è diretta verso l'esterno del nucleo nell'emisfero meridionale e verso l'interno nell'emisfero settentrionale. Ma in alcune regioni anomale vale l'opposto. Tra il 1980 e il 2000 queste cosiddette aree di flusso inverso si sono moltiplicate e ingrandite; se dovessero inglobare entrambi i poli, potrebbe seguire un'inversione di polarità.

SIMULARE LE INVERSIONI DI POLARITÀ

Le simulazioni tridimensionali della geodinamo sono in grado di produrre inversioni spontanee del dipolo magnetico terrestre, offrendo un modo per studiare l'origine delle inversioni del passato testimoniate dalla documentazione geologica. Una di esse mostrava un'inversione tipica di un modello sviluppato in collaborazione da uno di noi (Glatzmaier), verificatasi lungo un intervallo di tempo di 9000 anni. Questo evento è rappresentato sotto forma di mappe del campo di dipolo magnetico alla superficie terrestre e in corrispondenza del confine nucleo-mantello (*al centro*), dove il campo è più complesso. Un terzo modo per visualizzare un'inversione di polarità è dato, infine, dai modelli che utilizzano le linee di campo magnetico.

Le mappe iniziano con polarità normale, in cui gran parte del flusso magnetico complessivo punta verso l'esterno rispetto al nucleo (*giallo*) nell'emisfero sud e verso l'interno rispetto al nucleo (*blu*) nell'emisfero nord (*a*). L'inizio dell'inversione è segnato da aree di flusso magnetico inverso (*blu a sud e gialle a nord*) che ricordano quelle attualmente in formazione al confine nucleo-mantello della Terra. In circa 3000 anni le aree di flusso inverso hanno fatto diminuire l'intensità del campo di dipolo fino a sostituirlo con un campo di transizione più debole ma complesso al confine nucleo-mantello (*b*). L'inversione chiude il ciclo in 6000 anni, quando le aree di flusso inverso iniziano a prevalere sulla polarità originale al confine nucleo-mantello (*c*). Se osservata solo alla superficie, a questo punto l'inversione è completa, ma servono altri 3000 anni perché il dipolo si inverta in tutto il nucleo (*d*).

Il modello delle linee di campo magnetico illustra il campo magnetico immerso nel nucleo (*groviglio centrale*) e il dipolo emergente (*linee curve*) 500 anni prima della metà di un'inversione di dipolo magnetico (*a*), a metà dell'inversione (*b*) e 500 anni dopo, quando l'inversione è quasi completa (*c*).

Gary A. Glatzmaier

Jen Christiansen

Polarità normale
Polarità inversa
Presente
150 140 130 120 110 100 90 80 70 60 50 40 30 20 10 0
Milioni di anni fa

UNA STORIA ANTICA. Le inversioni di polarità del campo geomagnetico si sono verificate centinaia di volte negli ultimi 150 milioni di anni e probabilmente si verificano da molto più tempo. I geologi hanno scoperto queste inversioni studiando i minerali magnetici, che si allineano al campo magnetico terrestre quando una roccia viene riscaldata. Successivamente, i minerali conservano l'orientazione del campo nel momento in cui la roccia si solidifica.

tici turbolenti che distorcono le linee del campo magnetico probabilmente si verificano su una scala di metri, o decine di metri, quindi molto meno della risoluzione più fine che può raggiungere un modello geodinamico globale di oggi su un supercomputer di oggi. Questo significa che tutti i modelli tridimensionali della geodinamo finora hanno simulato il flusso semplice e su larga scala della convezione laminare, simile al flusso tranquillo dell'acqua in una conduttura.

Per approssimare gli effetti del flusso turbolento in modelli laminari, i ricercatori possono usare valori inverosimilmente grandi per certe proprietà del nucleo fluido che, nella realtà, sono troppo piccole per essere risolte numericamente. Per ottenere una turbolenza realistica in un modello computerizzato, i ricercatori devono ricorrere a una vista bidimensionale: ma il problema è che il flusso in due dimensioni non può sostenere una dinamo. Questi modelli, comunque, suggeriscono che i flussi laminari osservati nelle simulazioni geodinamiche attuali sono molto più tranquilli e semplici dei flussi turbolenti che esistono con ogni probabilità all'interno della Terra.

Probabilmente la differenza più significativa è nei percorsi seguiti dal fluido mentre risale attraverso il nucleo. In semplici simulazioni di convezione laminare, grandi pennacchi si estendono dal fondo del nucleo fino alla sua sommità. Nei modelli bidimensionali della turbolenza, d'altro canto, la convezione è contrassegnata da pennacchi e vortici multipli di piccola scala che si distaccano in prossimità dei confini superiore e inferiore del nucleo e che interagiscono con la principale zona di convezione interposta.

Queste differenze negli andamenti del fluido potrebbero avere un'enorme influenza sulla struttura del campo magnetico terrestre e sul tempo necessario perché avvengano cambiamenti. Ecco perché si sta assiduamente lavorando alla prossima generazione di modelli tridimensionali.

Le dinamo di laboratorio

Un modo per comprendere meglio la geodinamo potrebbe essere il confronto tra le dinamo dei modelli (in cui è assente la turbolenza) e quelle di laboratorio (in cui è assente la convezione). I geofisici hanno dimostrato per la prima volta la fattibilità di dinamo di laboratorio negli anni sessanta, ma la strada è stata lunga. La grande differenza di dimensioni tra un apparato di laboratorio e il vero nucleo di un pianeta era un fattore vitale. Una dinamo fluida ad auto-eccitazione richiede che un certo parametro privo di dimensioni, detto numero di Reynolds magnetico, superi un valore minimo, grosso modo pari a 10.

Il nucleo terrestre ha un numero di Reynolds magnetico molto grande, probabilmente attorno a 1000, poiché ha una grande dimensione lineare (il raggio del nucleo è di circa 3485 chilometri). In parole povere, è molto difficile creare un grande numero di Reynolds magnetico in piccoli volumi di fluido a meno che non si possa far muovere il fluido a velocità estremamente alte.

Il sogno di generare un campo magnetico spontaneo in una dinamo fluida in laboratorio si è realizzato per la prima volta nel 2000, quando due gruppi, uno in Lettonia e l'altro in Germania, hanno ottenuto l'autogenerazione in grandi volumi di sodio liquido. Entrambi i gruppi sono riusciti a ottenere un flusso di fluido ad alta velocità in un sistema di condutture elicoidali della lunghezza di 1-2 metri, raggiungendo un numero di Reynolds magnetico critico di circa 10.

Ai progetti di dinamo di laboratorio e alle simulazioni più realistiche già in via di sviluppo si affianca il satellite internazionale CHAMP (Challenging Minisatellite Payload), che sta mappando il campo geomagnetico con precisione sufficiente a misurarne direttamente e in tempo reale i cambiamenti in corrispondenza del confine tra nucleo e mantello. Nei cinque anni della sua missione il satellite dovrebbe fornire un'immagine continua del campo geomagnetico, consentendo di osservare sia la progressiva crescita delle aree di flusso inverso sia ulteriori indizi per spiegare come mai il campo di dipolo stia declinando.

La nostra opinione è che una sintesi di questi tre approcci – osservazioni satellitari, simulazioni al computer ed esperimenti di laboratorio – sarà raggiunta entro uno o due decenni. Con un quadro più completo della geodinamo, potremo capire se le nostre idee sul campo magnetico e le sue inversioni sono sulla strada giusta.

PER APPROFONDIRE

OLSON P., CHRISTENSEN U. e GLATZMAIER G.A., *Numerical Modeling of the Geodynamo: Mechanisms of Field Generation and Equilibration*, in «Journal of Geophysical Research», Vol. 104, n. B5, pp. 10383-10404, 1999.

BUFFETT B.A., *Earth's Core and the Geodynamo*, in «Science», Vol. 288, pp. 2007-2012, 16 giugno 2000.

GLATZMAIER G.A., *Geodynamo Simulations: How Realistic Are They?*, in «Annual Review of Earth and Planetary Sciences», Vol. 30, pp. 237-257, 2002.

KONO M. e ROBERTS P.H., *Recent Geodynamo Simulations and Observations of the Geomagnetic Field*, in «Reviews of Geophysics», Vol. 40, n. 4, p. 1013, 2002.

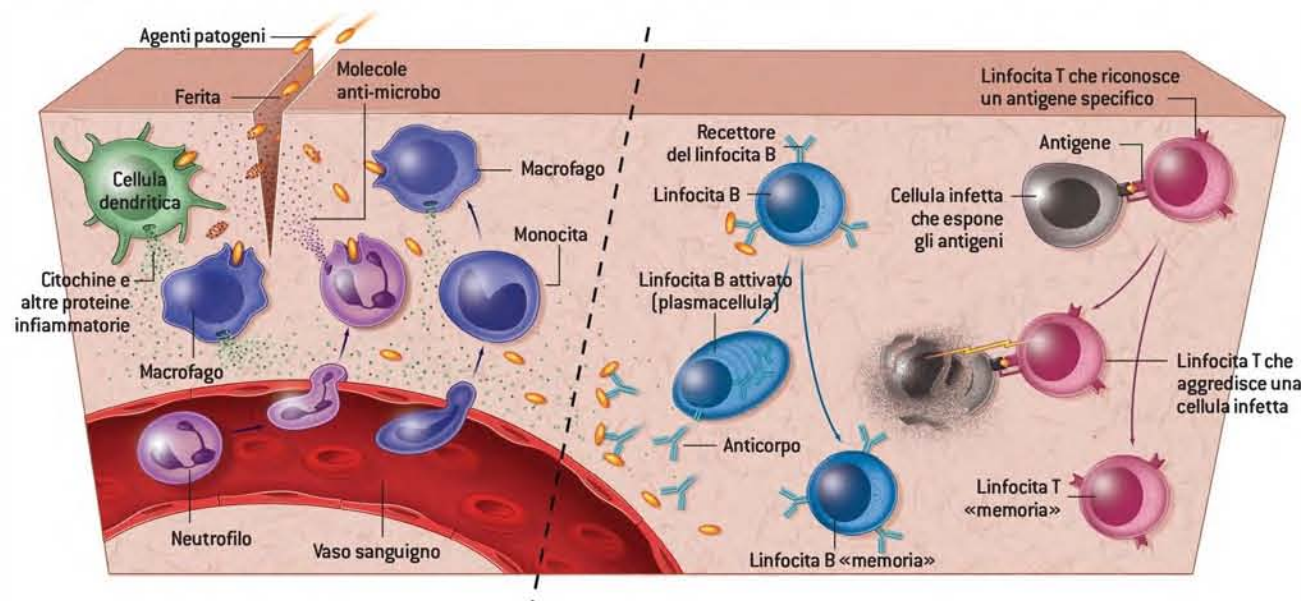
L'altra immunità

di Luke A.J. O'Neill

A lungo trascurata dalla scienza, la risposta immunitaria innata è il primo sbarramento difensivo dell'organismo. Scoperte sorprendenti sul suo funzionamento potrebbero portare a nuove terapie

Un uomo sta rientrando a casa con il treno della sera quando il passeggero che gli siede accanto inizia a tossire. Mentre si scherma dietro al giornale augurandosi che il vicino non abbia nulla di serio, il suo sistema immunitario si mette al lavoro. Se il microbo che il suo malaticcio vicino sta diffondendo nell'aria è uno di quelli che il nostro pendolare ha già incontrato in precedenza, un intero battaglione di cellule immunitarie addestrate – la fanteria del cosiddetto sistema immunitario adattativo – si ricorderà di quel particolare aggressore e lo spazzerà via nel giro di poche ore, senza che il nostro pendolare si accorga di essere stato contagiato. Se però il virus o il batterio è tra quelli contro cui non ha mai combattuto, interverrà un tipo diverso di risposta immunitaria. Questo sistema immunitario «innato» riconosce famiglie generiche di molecole prodotte da un'ampia gamma di agenti patogeni. Quando individua le molecole estranee, il sistema innato scatena una risposta infiammatoria in cui alcune cellule deputate a difendere l'organismo cercano di isolare l'invasore bloccandone la diffusione. L'attività di queste cellule e delle sostanze chimiche che producono accelera il processo di arrossamento e il gonfiore che compaiono nel sito dell'infezione, e giustifica allo stesso tempo la comparsa della febbre, i dolori muscolari e gli altri sintomi pseudo-influenzali che accompagnano molte infezioni. L'aggressione di tipo infiammatorio è sferrata inizialmente da recettori detti *Toll-like* (TLR), un'antica famiglia di proteine cui spetta il compito di modulare l'immunità innata negli organismi, dai granchi all'uomo. Se i recettori TLR falliscono, l'intero sistema immunitario si sgretola, lasciando il corpo in balia dell'infezione. Tuttavia, anche un eccesso di attività dei recettori può causare disturbi che si manifestano con una cronica e pericolosa infiammazione, come l'artrite, il lupus e addirittura le malattie cardiovascolari.

LE DUE DIVISIONI DEL SISTEMA IMMUNITARIO

Il sistema immunitario dei mammiferi ha due divisioni complementari. Quella innata (*a sinistra*) agisce vicino ai siti d'ingresso nell'organismo, ed è sempre pronta. Se questa non riesce a contenere un patogeno, scende in campo la divisione adattativa (*a destra*), che sferra un attacco tardivo ma altamente specifico nei confronti di quel particolare aggressore.

IL SISTEMA IMMUNITARIO INNATO

Il sistema include, fra l'altro, anche molecole ad azione antimicrobica e diverse specie di fagociti (cellule che ingeriscono e distruggono i patogeni). Queste cellule, come le cellule dendritiche e i macrofagi, attivano anche una risposta infiammatoria poiché secernono proteine chiamate citochine che richiamano dal circolo ematico un flusso di cellule con funzioni di difesa. Tra le cellule così reclutate ci sono numerosi macrofagi, soprattutto monociti (che possono maturare in macrofagi) e neutrofili.

IL SISTEMA IMMUNITARIO ADATTATIVO

I protagonisti di questo sistema sono i linfociti B e T. Le cellule B attivate producono molecole anticorpali che si legano agli antigeni distruggendo subito l'aggressore oppure marcandolo perché sia attaccato da altri. I linfociti T riconoscono gli antigeni esposti sulla superficie cellulare. Alcuni di essi eliminano i patogeni indirettamente, contribuendo ad attivare altri linfociti T e B. Altri ancora agiscono direttamente, attaccando le stesse cellule infettate. Entrambi i linfociti T e B generano cellule «memoria» che eliminano gli invasori già incontrati.

La scoperta dei recettori TLR ha suscitato tra gli immunologi un'euforia generale, e oggi un gran numero di ricercatori si è dedicato a questa linea d'indagine nella speranza di trovare la spiegazione ai molti misteri che ancora ammantano l'immunità, le infezioni e le malattie che coinvolgono anomalie nelle difese immunitarie. Lo studio dei recettori TLR e degli eventi molecolari che hanno luogo dopo che queste molecole sono entrate in contatto con un agente patogeno sta iniziando a rivelare potenziali bersagli per farmaci che potrebbero incrementare l'attività protettiva dell'organismo, rafforzare i vaccini e curare un'ampia gamma di malattie devastanti e potenzialmente mortali.

La cenerentola delle immunità

Fino a cinque anni fa, parlando del sistema immunitario la parte del leone spettava al sistema di difesa adattativo. I libri di testo fornivano dettagliate descrizioni sulla capacità dei linfociti B di produrre anticorpi che si legano a specifiche proteine, gli antigeni, presenti sulla superficie degli agenti patogeni invasori. Ma davano molto spazio anche ai linfociti T, cellule che espongono sulla loro superficie recettori in grado di riconoscere frammenti proteici di origine patogena. Questa risposta è chiamata adattativa perché nel corso di un'infezione si adatta in modo da gestire in maniera ottimale il particolare microrganismo responsabile della malattia.

L'immunità adattativa si è conquistata spazio sotto i riflettori anche perché fornisce il sistema immunitario di memoria: una volta eliminata un'infezione, i linfociti B e T specificamente addestrati rimangono nei paraggi, e istruiscono il corpo a respingere aggressioni successive. È questa capacità di ricordare le infezioni pregresse che consente ai vaccini di proteggerci dalle malattie di origine virale o batterica. I vaccini, infatti, espongono l'organismo a una versione indebolita di un patogeno (o a suoi frammenti del tutto innocui), ma il sistema immunitario reagisce come reagirebbe nei confronti di un'aggressione reale, generando cellule memoria con funzione protettiva. Grazie alla presenza di linfociti T e B, dopo che un organismo ha incontrato un microbo e gli è sopravvissuto non ne sarà sopraffatto una seconda volta.

Il sistema immunitario innato, al confronto, appariva piuttosto scialbo. I ricercatori erano convinti che i suoi componenti – compresi gli enzimi ad azione antibatterica presenti nella saliva e un gruppo di proteine collegate fra loro (chiamate collettivamente «complemento») che uccidono i batteri nel flusso sanguigno – fossero meno sofisticati degli anticorpi specifici e dei linfociti T killer, anche perché il sistema immunitario innato non modula le proprie risposte allo stesso modo di quello adattativo.

Ma liquidando la risposta immunitaria innata come noiosa e priva di interesse gli immunologi trascuravano una scomoda realtà: il sistema immunitario collegato adattativo non può funzionare se manca la più «grezza» risposta innata. Il sistema innato produce proteine segnale, le citochine, capaci non solo di indurre l'infiammazione, ma di attivare anche i linfociti B e T necessari per la risposta adattativa. Per funzionare in modo ottimale il sistema più sofisticato ha bisogno del suo compagno più umile.

Alla fine degli anni novanta gli immunologi disponevano di un'enorme quantità di informazioni sul funzionamento del sistema immunitario adattativo, ma avevano solo una vaga idea dell'immunità innata. In particolare, non capivano in che modo i microbi attivassero la risposta innata, o precisamente in che modo questo tipo di stimolo contribuisse a guidare la risposta

In sintesi/*L'immunità innata*

- L'immunità innata è un sistema di risposta rapida che capta ed elimina le infezioni causate da un agente patogeno. La risposta è mediata da una famiglia di molecole chiamate recettori Toll-like (TLR) composta da numerose cellule incaricate di difenderci.
- Quando i recettori TLR avvertono la presenza di un invasore, stimolano la produzione di una schiera di proteine segnale che inducono l'infiammazione e spingono l'organismo ad attivare una risposta immunitaria completa.
- Se i recettori TLR sono meno attivi del dovuto, la risposta immunitaria fallisce. Se invece sono più attivi del necessario, possono dare origine a disturbi come l'artrite reumatoide e addirittura a malattie cardiovascolari.
- Comprendere come modificare i TLR o le proteine con cui questi recettori interagiscono potrebbe offrire nuove opzioni terapeutiche per la cura di malattie di natura infettiva e infiammatoria.

UN MOSCERINO DELLA FRUTTA privo della proteina Toll è colpito da un'infezione fungina aggressiva: le spore coprono il corpo dell'insetto (il capo è nell'angolo in basso a destra). Questa scoperta è stata una delle prime indicazioni che la drosofila ha bisogno della proteina Toll per proteggersi dalle malattie.

L'AUTORE

LUKE A.J. O'NEILL ha conseguito il PhD in farmacologia all'Università di Londra, nel 1985, per le sue ricerche sulla citochina pro-infiammatoria interleuchina-1 (IL-1). Attualmente è professore alla Science Foundation Ireland e responsabile del Dipartimento di biochimica del Trinity College di Dublino.

adattativa dei linfociti T e B. Di lì a poco, però, compresero che buona parte della risposta si celava nei recettori TLR, prodotti da diverse cellule del sistema immunitario. Tuttavia, per riuscire a caratterizzare queste proteine gli scienziati hanno dovuto seguire un percorso tortuoso, che ha attraversato i processi di sviluppo del moscerino della frutta, la ricerca di nuovi farmaci contro l'artrite e addirittura il neonato campo della genomica.

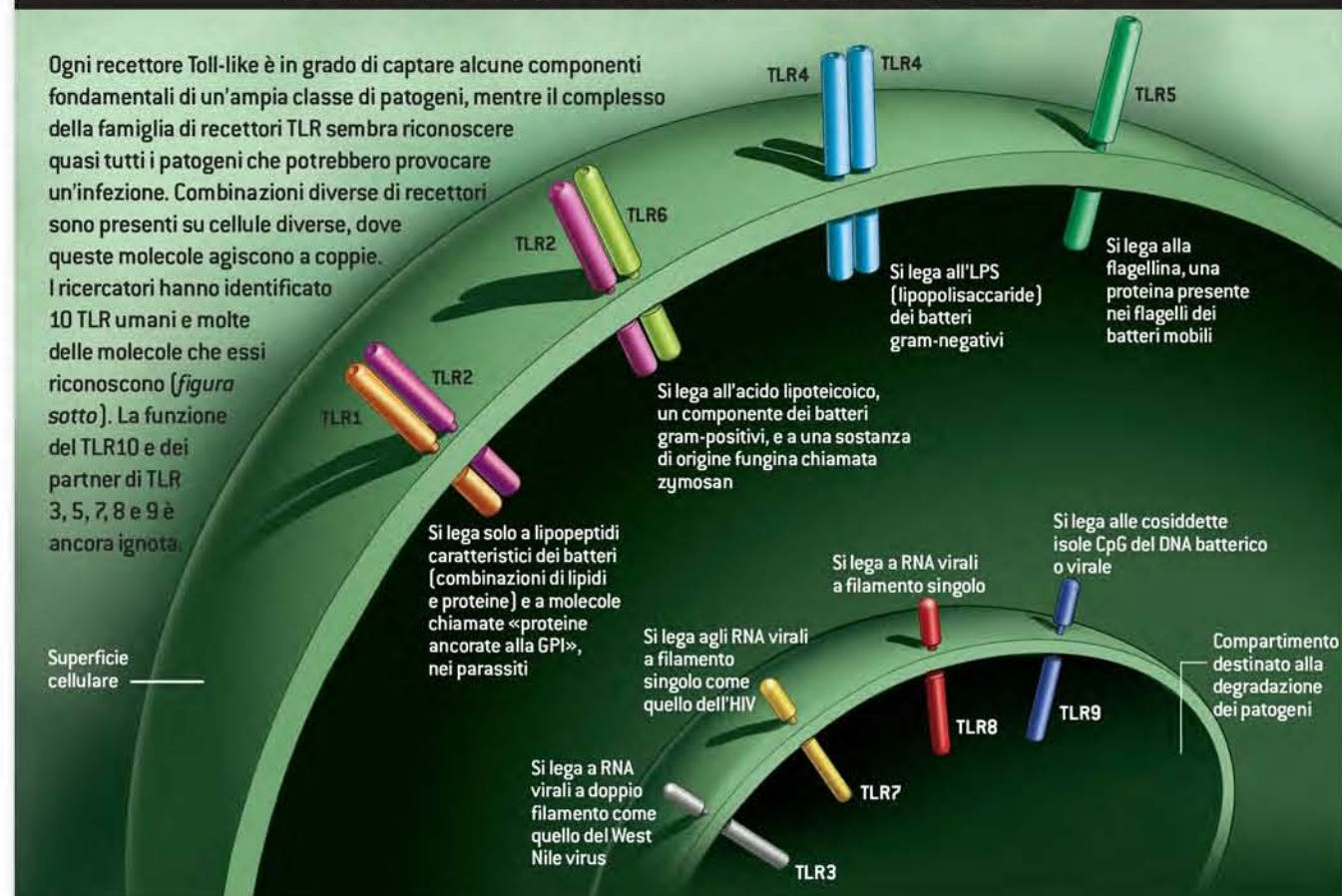
Una proteina stravagante

Il cammino iniziò nei primi anni ottanta con la scoperta delle citochine. Queste proteine con funzione di messaggero sono prodotte da diversi tipi di cellule immunitarie, fra cui i macrofagi e le cellule dendritiche. I macrofagi pattugliano i tessuti dell'organismo a caccia di segnali che indicano un processo infettivo, e quando captano una proteina estranea danno inizio alla risposta infiammatoria. In particolar modo, inglobano e distruggono l'invasore che espone quella proteina e producono una serie di citochine, alcune delle quali lanciano un allarme che richiama altre cellule nel sito dell'infezione, mettendo tutto il sistema immunitario in stato di allarme. Le cellule dendritiche fagocitano i microbi invasori e intercettano i linfonodi, dove presentano frammenti delle proteine del patogeno ad armate di linfociti T, e liberano citochine. Tutte queste attività concorrono ad attivare la risposta immunitaria adattativa.

Per studiare le funzioni delle singole citochine i ricercatori dovevano trovare la maniera di indurne la produzione. Il modo più efficace per stimolare i macrofagi e le cellule dendritiche a produrre queste molecole in laboratorio, si è scoperto, è esporre queste cellule ai batteri, o ancora meglio, a specifiche componenti batteriche. In particolare, a stimolare una potente risposta immunitaria è una molecola prodotta da un'ampia gamma di batteri, chiamata lipopolisaccaride (LPS). Nell'uomo, l'esposizione a LPS scatena la febbre e può portare a shock settico, una sorta di cortocircuito vascolare mortale causato da un'azione dirompente e distruttiva delle cellule immunitarie. LPS evoca questa risposta infiammatoria stimolando macrofagi e cellule dendritiche a liberare due citochine: il fattore di necrosi tumorale-alfa (TNF-alfa) e l'interleuchina-1 (IL-1).

In effetti, è stato dimostrato che sono proprio le citochine a regolare la risposta infiammatoria stimolando le cellule immunitarie all'azione. Se non sono tenute sotto controllo, queste molecole possono accelerare la comparsa di disturbi come l'artrite reumatoide, una malattia autoimmune caratterizzata da un'eccessiva infiammazione che provoca la distruzione delle articolazioni. Perciò i ricercatori ipotizzarono che, riuscendo a limitare gli effetti di TNF-alfa e di IL-1, si sarebbe potuto rallentare la progressione della malattia, alleviando al contempo la sofferenza dei pazienti. Per mettere a punto una simile terapia, però, c'era bisogno di maggiori informazioni sul funzionamento di queste molecole, così il primo passo fu quello di identificare le proteine con cui esse interagiscono.

Nel 1988, John Sims e i suoi colleghi della Immunex di Seattle scoprirono un recettore proteico che riconosce IL-1. Questo recettore è ancorato sulla membrana di molte cellule diverse dell'organismo, tra cui anche i macrofagi e le cellule dendritiche. La porzione recettoriale che sporge all'esterno della cellula si lega a IL-1, mentre il segmento che giace all'interno trasmette il messaggio che indica che IL-1 è stata captata. Sims ha esaminato con attenzione la porzione interna del recettore per IL-1, nella speranza di ricavarne indizi sul modo in cui la proteina trasmette il suo messaggio: sperava, per esempio, che lo studio del recettore gli rivelasse quali sono le molecole segnale che esso attiva all'interno delle cellule. Invece il dominio interno del recettore umano per IL-1 si è rivelato diverso da ogni altro recettore che i ricercatori avevano analizzato in precedenza, cosa che li ha confusi non poco.

Poi, nel 1991, mentre lavorava alla risoluzione di un problema completamente diverso, Nick Gay dell'Università di Cambridge ha fatto una strana scoperta. Stava cercando proteine simili a una proteina sintetizzata dal moscerino della frutta, chiamata *Toll*, che in tedesco significa «bizzarro, stravagante». Toll era stata identificata a Tubinga, in Germania, da Christiane Nusslein-Volhard, che l'aveva battezzata così perché le drosofile che ne sono prive hanno un aspetto piuttosto strano. Questa proteina aiuta l'embrione di drosofila in via di sviluppo a differenziare le regioni apicali da quelle basali, tanto che il corpo dei moscerini in cui la proteina è assente appare a soqquadro, come se gli insetti avessero perduto la lateralizzazione. Gay passò in rassegna il database che conteneva tutte le sequenze geniche conosciute a quel tempo, alla ricerca di geni che presentassero un'elevata omologia di sequenza con il gene che codifica per Toll, e che potessero quindi codificare per proteine simili, o Toll-like. Alla fine scoprì che una parte della proteina Toll mostra una sorprendente somiglianza con la porzione interna del recettore umano per IL-1, il segmento che aveva meravigliato così tanto Sims.

In un primo momento, la scoperta parve priva di significato: per quale motivo una proteina coinvolta nei processi infiammatori umani avrebbe dovuto somigliare a una proteina che indica all'embrione di drosofila qual è la regione apicale? La scoperta rimase un mistero fino al 1996, quando Jules A. Hoffmann e i suoi collaboratori del CNRS di Strasburgo dimostrarono che la drosofila usa le proteine Toll per difendersi dalle infezioni fungine. Nella drosofila, almeno in apparenza, Toll svolge numerose funzioni ed è coinvolta tanto nello sviluppo embrionale quanto nell'immunità adulta.

Pulci d'acqua, stelle marine ed esseri umani

La somiglianza fra il recettore per IL-1 e la proteina Toll riguarda esclusivamente i segmenti proteici inseriti all'interno della cellula. I domini esposti all'esterno, invece, sono abbastanza diversi fra loro. Questa osservazione ha indotto i ricercatori a cercare delle proteine umane che somigliassero completamente a Toll. Dopo tutto, solitamente l'evoluzione conserva le strutture che funzionano meglio, e se Toll era in grado di mediare le risposte immunitarie nel moscerino della frutta era probabile che proteine simili avessero un'analoga funzione anche nell'uomo.

Nel 1997, su suggerimento di Hoffmann, Ruslan Medzhitov e Charles Janeway Jr. della Yale University scoprirono la prima di queste proteine, che chiamarono «Toll umana». Nel giro di sei mesi Fernando Bazan e i suoi colleghi della DNAX di Palo Alto, in California, identificarono cinque proteine Toll umane, a cui diedero il nome di recettori Toll-like (TLR). Uno di questi, TLR4, era la stessa proteina Toll umana descritta da Medzhitov e Janeway.

In quel momento, i ricercatori non sapevano ancora con precisione quale poteva essere il contributo dei recettori TLR all'immunità umana. Janeway aveva scoperto che riempiendo di recettori TLR4 la membrana delle cellule dendritiche si induceva la produzione di citochine; tuttavia non era in grado di precisare in che modo TLR4 era attivato durante un'infezione. La risposta giunse alla fine del 1998, quando Bruce Beutler e collaboratori, allo Scripps Institute di La Jolla, in California, scoprirono che topi mutanti incapaci di rispondere allo stimolo di LPS hanno una versione difettosa del recettore TLR4. Mentre i topi normali muoiono di sepsi nel giro di un'ora dall'iniezione di LPS, i mutanti sopravvivono e si comportano come se non fossero neppure stati esposti alla molecola. In altre parole, la mutazione nel gene che codifica per il recettore TLR4 rende questi animali resistenti a LPS.

La scoperta confermò in modo inequivocabile che il recettore TLR4 si attiva quando interagisce con LPS, dal momento che il suo compito è proprio quello di avvertire la presenza di questa molecola. Questa constatazione costituì un importante progresso nel campo della sepsi, poiché svelò il meccanismo molecolare che sta alla base dell'infiammazione, fornendo al contempo un nuovo possibile bersaglio per la cura di un disturbo per cui vi era una drammatica urgenza di terapie efficaci. Nel giro di due

LE PULCI DI MECHNIKOV

La scoperta dei recettori Toll e Toll-like ha ampliato una linea di ricerca iniziata oltre un secolo fa, quando il biologo russo Ilya Mechnikov scoprì, in pratica, l'immunità innata. Negli anni ottanta dell'Ottocento, Mechnikov staccò alcune spine da un albero di mandarino e le infilò in una larva di stella marina. Il mattino seguente notò che le spine erano circondate da cellule mobili che, così egli suppose, stavano inglobando i batteri introdotti assieme ai corpi estranei. Successivamente Mechnikov scoprì che la pulce d'acqua (*Daphnia*) esposta a spore fungine attiva una risposta analoga. Questo processo, chiamato fagocitosi, è il fulcro attorno a cui ruota l'immunità innata, e la sua scoperta meritò a Mechnikov il premio Nobel nel 1908.

MECHNIKOV era un personaggio singolare. A proposito del periodo in cui lavorò all'Istituto Pasteur, la biografia della Fondazione Nobel riporta: «Qualsiasi tempo facesse, indossava sempre delle soprascarpe e portava con sé un ombrello; aveva le tasche strapiene di articoli scientifici e portava sempre lo stesso cappello: e spesso, quando era eccitato, vi si sedeva sopra».

anni i ricercatori stabilirono che la maggior parte dei recettori TLR – di cui attualmente si conoscono dieci varianti umane – riconosce molecole che risultano importanti per la sopravvivenza di batteri, virus, funghi e parassiti. Il recettore TLR2, per esempio, si lega all'acido lipoteicoico, una componente della parete cellulare batterica. Il recettore TLR3 riconosce il genoma dei virus mentre il TLR5 riconosce la flagellina, una proteina che forma i flagelli ondulati usati dai batteri per nuotare. Il TLR9, infine, riconosce una sequenza genetica segnale chiamata CpG, presente nei batteri e nei virus sotto forma di lunghe stringhe e in una forma chimica diversa dalle sequenze CpG che caratterizzano il DNA dei mammiferi.

È evidente che i recettori TLR si sono evoluti per riconoscere e reagire a molecole che rappresentano componenti fondamentali degli organismi patogeni. L'eliminazione o l'alterazione chimica di uno qualsiasi di questi elementi potrebbe menomare un agente infettivo e impedire ai patogeni di schivare i recettori TLR mutando fino a che queste componenti diventano irriconoscibili. E dal momento che molti microrganismi hanno in comune un gran numero di questi elementi, bastano appena dieci TLR per proteggerci praticamente da ogni patogeno conosciuto.

L'immunità innata non è un'esclusiva dell'uomo. Questo sistema, infatti, è molto antico: anche le mosche hanno un sistema di risposta immunitaria innato, come pure le stelle marine, le pulci d'acqua e quasi ogni altro organismo esaminato finora, molti dei quali utilizzano i recettori TLR come innesco. I vermi nematodi hanno un sistema che consente loro di percepire i batteri infettivi e nuotare in direzione opposta per evitarli. Anche le piante sono ricche di TLR: il tabacco ne ha uno chiamato proteina N, che gli serve per difendersi dal virus del mosaico del tabacco. La piantina *Arabidopsis* ne ha più di 200. Molto probabilmente, le prime proteine Toll-like hanno avuto origine in un organismo unicellulare che è stato l'antenato comune di piante e animali, e forse queste molecole hanno addirittura contribuito alla nostra evoluzione, agevolandola. Se fossero stati privi di un efficace mezzo di difesa dalle infezioni, probabilmente gli organismi pluricellulari non sarebbero neanche riusciti a sopravvivere.

PER APPROFONDIRE

MEDZHITOV R. e JANEWAY C., *Innate Immunity*, in «New England Journal of Medicine», Vol. 343, n. 5, pp. 338-344, 3 agosto 2000.

BEUTLER B., *Inferences, Questions and Possibilities in Toll-like Receptor Signaling*, in «Nature», Vol. 430, pp. 257-263, 8 luglio 2004.

IWASAKI A. e MEDZHITOV R., *Toll-like Receptor Control of the Adaptive Immune Responses*, in «Nature Immunology», Vol. 5, n. 10, pp. 987-995, ottobre 2004.

O'NEILL L.A.J., *TLRs: Professor Mechnikov, Sit on Your Hat*, in «Trends in Immunology», Vol. 25, n. 12, pp. 687-693, dicembre 2004.

Assalto al castello

Un tempo si pensava che il sistema immunitario innato offrisse una protezione non molto più sofisticata di quella delle mura di un castello: l'azione vera e propria sarebbe cominciata solo dopo che il nemico aveva fatto breccia e le truppe all'interno del castello – i linfociti T e B – cominciavano a combattere. Oggi sappiamo che le mura del castello sono costellate di sentinelle, i recettori TLR, che identificano gli invasori e suonano l'allarme per mobilitare le truppe e preparare lo spiegamento difensivo necessario a contrastare vigorosamente l'aggressione. In altre parole, i recettori TLR scatenano sia il sistema innato sia quello adattativo.

Il quadro che ne emerge è più o meno il seguente. Quando un patogeno entra per la prima volta nell'organismo, uno o più recettori TLR, come quelli presenti sulla superficie dei macrofagi sentinella e delle cellule dendritiche, si lega alle molecole estranee – per esempio a LPS presente sui batteri gram-negativi. Una volta in azione, i TLR inducono le cellule a liberare particolari serie di citochine. Queste proteine messaggero reclutano quindi ulteriori macrofagi, cellule dendritiche e altre cellule coinvolte nella risposta immunitaria affinché abbattano e aggrediscano in maniera non specifica il microbo predatore. Allo stesso tempo, le citochine secrete da queste cellule possono produrre i classici sintomi dell'infezione, tra cui febbre e i dolori muscolari tipici dell'influenza.

I macrofagi e le cellule dendritiche che hanno fatto a pezzi un agente patogeno ne espongono i frammenti sulla loro superficie, assieme ad altre molecole che indicano la presenza di un organismo nocivo. I frammenti così esposti, assieme alle citochine liberate in risposta ai TLR, finiscono per attivare i linfociti T e B. Queste cellule riconoscono quelle specifiche porzioni proteiche e, nell'arco di diversi giorni, sono stimolate a proliferare e a sferrare un attacco potente ed estremamente mirato contro quel particolare invasore. Senza l'effetto di innesco dei recettori TLR, i linfociti B e T non si attiverebbero e l'organismo non sarebbe in grado né di montare una risposta immunitaria completa, né di conservare alcun tipo di memoria relativa alle infezioni precedenti.

Dopo l'infezione iniziale, sul campo di battaglia resta un numero sufficiente di linfociti T e B «memoria», che permettono all'organismo di affrontare in modo più efficace l'invasore nel caso si ripresenti. Quando un microbo ricompare, le cellule memoria che lo riconoscono iniziano a proliferare con rapidità, rinforzando le difese in modo che possano facilmente sopraffare l'avversario. La rapidità con cui agisce questo esercito di cellule memoria è tale che il processo infiammatorio può addirittura

BERSAGLI FARMACOLOGICI

Le sostanze che attivano i recettori TLR, rafforzando la risposta immunitaria, potrebbero aumentare l'efficacia dei vaccini o proteggere dalle infezioni. Queste sostanze potrebbero addirittura stimolare il sistema immunitario a distruggere i tumori. Al contrario, farmaci che bloccano l'attività dei recettori TLR potrebbero rivelarsi utili per soffocare i disturbi di natura infiammatoria. Alcune molecole appartenenti a queste due classi sono in fase di studio.

TIPOLOGIA DI FARMACO	ESEMPI
Attivatore del recettore TLR4	MPL, un farmaco contro le allergie nonché adiuvante vaccinico (attivatore del sistema immunitario) prodotto dalla Corixa (Seattle), è in fase di trial clinico su larga scala.
Attivatore del recettore TLR7	ANA245 (isatoribina), una sostanza antivirale prodotta dalla Anandys di San Diego è in fase iniziale di trial sull'uomo per la cura dell'epatite C.
Attivatore dei recettori TLR7 e TLR8	Imiquimod, un farmaco prodotto dalla 3M per la cura delle verruche genitali, del cancro delle cellule basali della pelle e della cheratosi actinica è in commercio.
Attivatore del recettore TLR9	ProMune, un adiuvante vaccinico e farmaco per la cura del melanoma cutaneo e del linfoma non-Hodgkin, prodotto dalla Coley (Wellesley, Massachusetts) è in fase di trial clinico su larga scala.
Inibitore del recettore TLR4	E5564, un farmaco antisettico prodotto dalla Eisai (Teaneck, New Jersey) è in fase di trial clinico sull'uomo.
Inibitore generico dei TLR	RDP58, un farmaco prodotto dalla Genzyme (Cambridge, Massachusetts) e usato nelle coliti ulcerose e nel morbo di Crohn, sta entrando in trial clinici su larga scala.
Inibitore generico dei TLR	OPN101, un farmaco della Opsona (Dublino, Irlanda) usato per le malattie autoimmuni è in fase di sperimentazione su modelli animali di infiammazione.

non manifestarsi. Di conseguenza, la vittima non si rende conto di essere ammalata e può addirittura non notare l'infezione quando questa si ripresenta.

Dunque, l'immunità innata e l'immunità adattativa fanno parte dello stesso sistema che riconosce ed elimina i microbi, e l'interazione reciproca fra questi due sistemi è l'elemento che rende così forte il nostro sistema immunitario.

La scelta dell'arma

Per comprendere appieno in che modo i recettori TLR controllino l'attività immunitaria, gli immunologi devono identificare le molecole che trasmettono segnali dai TLR attivati ancorati sulla superficie della cellula fino al nucleo, mettendo in moto geni che codificano per citochine e altri attivatori dell'immunità. Questa linea di ricerca sta impegnando molti laboratori, e noi abbiamo già effettuato alcune affascinanti scoperte.

Oggi sappiamo che i TLR, come molti recettori situati sulla superficie cellulare, si assicurano l'aiuto di una nutrita schiera di proteine segnale che portano il messaggio fino al nucleo, un po' come i pompieri di una squadra che si passano i secchi d'acqua di mano in mano fino all'incendio. Tutti i TLR, con la sola eccezione di TLR3, trasmettono il loro segnale a una proteina adattatore chiamata MyD88. Quale sia la proteina successiva incaricata di trasmettere più in là il segnale dipende dal tipo di TLR: il mio laboratorio studia la proteina Mal, da noi scoperta, che aiuta a trasportare i segnali generati da TLR4 e TLR2. Per trasmettere il segnale, TLR4 ha anche bisogno di altre due proteine, Tram e Trif, mentre TLR3 fa affidamento sulla sola Trif. Shizuo Akira, dell'Università di Osaka, ha dimostrato che i topi ingegnerizzati geneticamente in modo da non produrre nessuna di queste proteine segnale mediatrici non riescono a rispondere ai prodotti batterici: questa osservazione suggerisce che le proteine associate ai TLR potrebbero rappresentare nuovi bersagli per nuovi agenti antinfiammatori o antimicrobici.

L'interazione con gruppi diversi di proteine segnale consente ai TLR di attivare diversi set di geni che perfezionano le risposte cellulari in modo che corrispondano meglio al tipo di patogeno che incontrano. TLR3 e TLR7, per esempio, percepiscono la presenza dei virus. Quindi danno il via a una successione di interazioni molecolari che inducono la produzione e il rilascio di interferone, la principale citochina ad azione antivirale. TLR2, attivato dai batteri, stimola il rilascio di una miscela di citochine tra le quali non figura l'interferone, che però risultano più adatte ad attivare un'efficace risposta antibatterica da parte dell'organismo.

La scoperta che i TLR possono individuare diversi prodotti

microbici e contribuire a modulare la risposta immunitaria per ostacolare il nemico sta rivoluzionando le teorie che vedevano nel sistema immunitario innato solo una barriera statica e incapace di discriminazione. In realtà, si tratta di un sistema dinamico che controlla quasi ogni aspetto dell'infiammazione e dell'immunità.

Dalla *Legionella* al Lupus

Una volta riconosciuto il ruolo di primo piano dei TLR, i ricercatori hanno subito sospettato che numerosi disturbi di natura infettiva e collegati all'immunità potevano dipendere dalla presenza di forme tronche o eccessivamente attive di questi recettori. L'intuizione si è rivelata corretta: i difetti nell'immunità innata determinano una maggiore suscettibilità nei confronti di virus e batteri. Nel corso di uno studio durato vent'anni, è emerso che chi è dotato di una forma ipoattiva del recettore TLR4 ha il 50 per cento di probabilità in più di contrarre banali infezioni quotidiane, come raffreddori e influenza. Invece, chi muore a causa del cosiddetto morbo del legionario spesso è portatore di una mutazione nel gene per il recettore TLR5 che disattiva la proteina, compromettendone la risposta immunitaria innata e rendendola incapace di annientare il batterio *Legionella*. D'altro canto, una risposta immunitaria troppo zelante può essere altrettanto funesta. Negli Stati Uniti e in Europa oltre 400.000 persone all'anno muoiono di sepsi, complicazione che deriva da un'eccessiva risposta immunitaria guidata dai TLR4.

Altri studi puntano in direzione del ruolo dei TLR nelle malattie autoimmuni come il lupus eritematoso sistemico e l'artrite reumatoide. In questi casi i TLR possono reagire ai prodotti derivanti dalle cellule danneggiate, diffondendo una risposta infiammatoria inappropriata e promuovendo una reazione errata da parte del sistema immunitario adattativo. Nel lupus, per esempio, si è scoperto che TLR9 reagisce contro il DNA dell'organismo. L'immunità innata e i TLR potrebbero avere un ruolo anche nelle malattie cardiache: sembra infatti che le persone che hanno una mutazione nei TLR4 siano meno inclini a sviluppare malattie cardiovascolari. Lo spegnimento del recettore TLR4 potrebbe avere un effetto cardioprotettore, perché sembra che l'infiammazione contribuisca alla formazione delle placche che occludono le arterie coronarie. Perciò, la manipolazione del TLR4 potrebbe costituire un altro approccio in grado di prevenire o di limitare questa condizione.

Regolare il volume

La maggior parte delle grandi aziende farmaceutiche è interessata a utilizzare i TLR e le proteine segnale loro associate, poiché queste molecole potrebbero essere un bersaglio per farmaci in grado di curare infezioni e disturbi legati all'immunità. Con il diffondersi della resistenza agli antibiotici, la comparsa di virus nuovi e più virulenti e la minaccia crescente del bioterrorismo, è sempre più urgente riuscire a sviluppare nuovi metodi per aiutare il nostro organismo a combattere le infezioni.

Le ricerche sui TLR, per esempio, potrebbero condurre allo sviluppo di vaccini più sicuri e più efficaci. La bontà della maggior parte dei vaccini dipende dall'inclusione di un adiuvante, una sostanza che dà il via alla risposta infiammatoria, che a sua volta aumenta la capacità del sistema adattativo di produrre le cellule memoria auspicate. L'adiuvante impiegato nella maggior parte dei vaccini odierni non provoca una risposta adattativa completa, ma favorisce piuttosto i linfociti B rispetto ai linfociti T. Per scatenare una risposta più energica, diverse aziende hanno messo gli occhi sui composti che attivano TLR9, un recettore che riconosce un'ampia gamma di batteri e di virus e che determina una consistente risposta immunitaria.

I TLR, inoltre, ci stanno insegnando a difenderci da armi biologiche come il virus del vaiolo. Questi virus, che rappresentano un'arma potenziale nell'arsenale dei bioterroristi, possono inattivare i TLR evitando così di essere individuati ed eliminati. In collaborazione con Geoff Smith dell'Imperial College di Londra, i miei collaboratori hanno scoperto che rimuovendo la proteina virale che inattiva i TLR riuscivamo a produrre un virus indebolito, che poteva fungere da base per un vaccino che difficilmente avrebbe provocato un'infezione accidentale e fatale di vaiolo.

Disponendo di adeguate conoscenze sui TLR e sull'immunità innata, i medici potrebbero riuscire a prevedere quali sono i pazienti che reagiscono debolmente durante un'infezione e a curarli in maniera più aggressiva. Se, per esempio, dei pazienti arrivassero in ospedale con i sintomi di un'infezione batterica e si scoprisse che hanno una forma mutata del recettore TLR4, il medico potrebbe bombardarli di antibiotici o di sostanze capaci, in qualche modo, di sostenere la loro risposta immunitaria per impedire all'infezione di causare danni duraturi.

Naturalmente, bisogna trovare un equilibrio tra l'esigenza di stimolare una risposta immunitaria sufficiente a eliminare il microbo e il rischio di accelerare una risposta di tipo infiammatorio che provocherebbe più danni che benefici. Analogamente, qualunque farmaco somministrato con l'intento di attenuare l'infiammazione reprimendo l'attività dei TLR e il rilascio delle citochine non deve, allo stesso tempo, ridurre le difese dell'organismo contro le infezioni.

I farmaci antinfiammatori che interferiscono con il TNF-alfa, una delle citochine prodotte in seguito all'attivazione di TLR4, offrono un quadro che invita alla cautela. Il TNF-alfa prodotto durante un'infezione e un'infiammazione può accumularsi nelle articolazioni dei pazienti affetti da artrite reumatoide. I composti antinfiammatori alleviano l'artrite, ma alcune persone che li assumono finiscono con l'ammalarsi di tubercolosi. È probabile che l'infezione sia latente, ma contenendo la risposta infiammatoria si corre il rischio di soffocare le risposte patogeno-specifiche permettendo al batterio di riemergere.

In breve, i TLR sono come la manopola per regolare il volume di un impianto stereo, poiché bilanciano l'immunità adattativa e l'infiammazione. I ricercatori e le compagnie farmaceutiche stanno ora cercando la maniera per regolare questi controlli, in modo che riducano l'infiammazione senza mettere fuori combattimento l'immunità.

Considerando che fino a sette anni fa dei TLR non si sentiva nemmeno parlare, possiamo senz'altro dire che i ricercatori hanno compiuto enormi progressi nella comprensione del ruolo che queste proteine giocano sul fronte avanzato delle difese dell'organismo. L'immunità innata, che per molto tempo è rimasta avvolta dall'oblio, è diventata all'improvviso la reginetta del ballo. LS

STOP allo SPAM

Che cosa si fa, e che cosa si potrebbe fare, per fermare l'alluvione delle e-mail «spazzatura»?

di Joshua Goodman, David Heckerman e Robert Rounthwaite

La prima e-mail «spazzatura» – un'offerta di un rappresentante commerciale della Digital Equipment Corporation – fu inviata nel 1978 a circa 400 utenti della rete Arpanet. Oggi la corrispondenza elettronica indesiderata, sotto forma di offerte commerciali non richieste, detta *spam*, costituisce oltre i due terzi di tutte le e-mail trasmesse via Internet, per un totale di miliardi di messaggi ogni giorno: per un terzo di tutti gli utenti di posta elettronica, lo spam rappresenta circa l'80 per cento dei messaggi ricevuti. Recentemente, il fenomeno è diventato ancor più preoccupante a causa della proliferazione dei cosiddetti attacchi di *phishing*, false e-mail che hanno tutta l'apparenza di provenire da persone o istituzioni «fidate», ma che in realtà sono inviate da truffatori il cui obiettivo è rubare i numeri di carta di credito o altre informazioni personali. Secondo uno studio condotto dalla Gartner Research nel 2004, gli attacchi di «phishing» costano al settore pubblico statunitense circa 1,2 miliardi di dollari all'anno.

Il fenomeno dello spam non affligge solo le e-mail. All'interno delle chat room si celano dei «robot» che, fingendosi umani, tentano di convincere gli utenti a collegarsi a siti pornografici. Gli utenti dei servizi di *instant messaging* (IM) sono vittime del cosiddetto spIM, ovvero messaggi commerciali inviati tramite messaggistica istantanea. I blog possono essere corrotti da «spammer di link» che danneggiano le operazioni dei motori di ricerca su Internet aggiungendo link fuorvianti e falsando le valutazioni sull'utilità dei siti web e degli stessi link.

A volte l'effetto soffocante dello spam sembra minare, se non addirittura a distruggere, le comunicazioni via Internet. Ma la realtà non è poi così tetra. Sono state ideate diverse tecniche per intercettare lo spam e scoraggiare chi ne fa uso, e molte altre sono in fase di elaborazione. I metodi presi in esame in questo articolo s'incentrano sul problema delle e-mail «spazzatura», anche se molti di essi possono essere applicati ad altre forme di spam. Nessuno è una soluzione definitiva, ma uniti tra loro – e adottati da un numero sufficiente di utenti – potrebbero davvero fare miracoli. Non è irrealistico sperare che un giorno le nostre caselle di posta elettronica ritorneranno quasi libere dallo spam.

La proliferazione di e-mail fraudolente è la conseguenza diretta di equilibri commerciali favorevoli. Lo spam è incredibilmente economico da distribuire: secondo le nostre stime, spedire un messaggio costa circa un centesimo di un centesimo di dollaro. A costi simili, uno spammer che guadagna 11 dollari a vendita ottiene comunque un profitto anche se il tasso di risposte ricevute è di uno ogni 100.000.

Jean-Francois Podevin

Uno degli aspetti più esasperanti dello spam è il suo continuo adattarsi ai nuovi tentativi di fermarlo. Ogni volta che gli autori di software scoprono un modo per attaccare lo spam, gli spammer trovano un sistema per eluderlo. Questa specie di «corsa agli armamenti» ha portato a una continua coevoluzione dei due fronti, con il risultato di una sempre maggiore sofisticazione sia dei «buoni» sia dei «cattivi».

Un altro serio problema è la difficoltà di esperti e legislatori nel definire lo spam. La maggior parte delle leggi lo etichetta come «e-mail commerciale non richiesta proveniente da una persona con cui non sussistono rapporti d'affari preesistenti». Ma questa definizione è troppo ampia. Recentemente, per esempio, abbiamo ricevuto via e-mail la proposta di trasformare in un film una breve storia che avevamo pubblicato su Internet. Il messaggio rispondeva ai requisiti della legge: non era stato richiesto, aveva carattere commerciale e proveniva da un mittente sconosciuto; eppure pochi lo riterrebbero spam.

Una definizione alternativa potrebbe includere il fatto che tipicamente lo spam è inviato a un gran numero di utenti. Ma qualche tempo fa abbiamo diramato una richiesta di contributi per una conferenza tecnica inviando messaggi a 50 persone mai incontrate prima che avevano pubblicato dei lavori su questo argomento. Nessuno di loro si è lamentato. Forse la migliore definizione dello spam è che si tratta di messaggi non richiesti e inviati in modo indiscriminato. Come accade per la pornografia, è estremamente difficile formulare una definizione precisa di spam, ma certamente lo riconosciamo quando invade le nostre caselle di posta.

BUONI E CATTIVI A CONFRONTO. Il software di selezione distingue le e-mail spazzatura da quelle legittime confrontando i messaggi in arrivo con esempi precedenti che gli utenti hanno definito «indesiderati».

Metamorfosi dei messaggi

Abbiamo cominciato a lavorare al problema dello spam nel 1997, quando Heckerman suggerì che i metodi di apprendimento automatico potevano rappresentare un'efficace strategia d'attacco. Da allora, come molti altri colleghi del settore dello sviluppo di software, abbiamo approfondito e progettato diversi approcci per fermare lo spam: questi comprendono insiemi di soluzioni tecniche e legali, e iniziative a livello industriale.

Alcuni dei primissimi metodi per bloccare lo spam sono state le cosiddette tecniche di verifica del *fingerprint*. In questi sistemi si cercano anzitutto degli esempi di spam e poi si lascia che i software li analizzino prendendone le «impronte digitali». L'impronta non è che un numero derivato dal contenuto del messaggio, in modo tale che messaggi simili o identici abbiano lo stesso numero. Per esempio, si potrebbe sommare il numero di A contenute in un messaggio, più 10 volte il numero delle B, più 100 volte quello delle C e così via. Quando arriva un nuovo messaggio, i programmi anti-spam calcolano la sua «impronta digitale» e la confrontano con quella dello spam conosciuto. Se combaciano, il messaggio viene cancellato.

Purtroppo questi metodi così diretti sono stati facilmente sconfitti dagli spammer, che cominciarono semplicemente ad aggiungere caratteri casuali ai loro messaggi. Gli esperti anti-spam hanno risposto con tecniche di verifica che cercano di escludere le sequenze di caratteri casuali, ma gli spammer hanno contrattaccato inserendo contenuti aleatori dall'apparenza più legittima, per esempio falsi bollettini meteorologici (*si veda il box a fronte*). In ultima analisi, rendere i sistemi di verifica del fingerprint abbastanza potenti da smascherare i trucchi degli spammer si è dimostrato estremamente difficile.

Filtri intelligenti

Invece di perseguire i metodi legati al fingerprint, il nostro gruppo decise di seguire una strada che sfruttava le capacità dei software ad apprendimento automatico. Questi programmi informatici specializzati possono imparare a distinguere le e-mail spam dai messaggi legittimi, e non si lasciano facilmente confondere dall'aggiunta di lettere o parole a caso.

All'inizio abbiamo provato il metodo di apprendimento automatico più semplice e comune. L'algoritmo Naive Bayes parte dalla probabilità di ricorrenza di ogni parola del messaggio. Per esempio, ognuna delle parole «clicca», «qui» e «cancella» può avere una probabilità 0,9 (il 90 per cento) di essere presente nel messaggio spam, ma solamente una probabilità 0,2 di apparire in e-mail legittime (1,0 è pari alla certezza). Moltiplicando le probabilità di tutte le parole in un messaggio e usando un principio statistico conosciuto come regola di Bayes, otteniamo una stima di quante probabilità ci sono che un messaggio sia spam. La strategia Naive Bayes funziona ottimamente nel determinare l'aspetto di una e-mail vera, e come tutti questi metodi ad apprendimento resiste ai trucchi più semplici. Tuttavia, ne abbiamo sempre conosciuto i limiti. Il suo presupposto che le parole nelle e-mail siano indipendenti e scollegate è in molti casi falso (per esempio «clicca» e «qui» spesso appaiono insieme), e questo ne altera i risultati.

Queste difficoltà ci hanno spinto a concentrare la nostra ricerca sui modelli discriminativi lineari che ottimizzano le ultime decisioni del modello nell'assegnare un peso alle varie caratteristiche del messaggio. Queste caratteristiche comprendono parole e proprietà del messaggio, per esempio se è stato inviato a molti destinatari. In qualche misura questi modelli possono imparare i rapporti tra le parole, per esempio possono «sapere» di non dover dare troppo peso ai termini che tendono a

In sintesi/*Proteggere l'e-mail*

- L'ondata crescente di e-mail indesiderate – il cosiddetto spam – minaccia l'integrità delle comunicazioni via Internet. Gli sviluppatori di software sono impegnati in una continua battaglia contro gli spammer, ossia coloro che inviano messaggi spazzatura.
- Il flusso di spam potrebbe essere contrastato da una combinazione di sistemi in parte nuovi e in parte già esistenti, tra cui filtri software intelligenti, sistemi che verificano la legittimità dei mittenti delle e-mail e divieti legali restrittivi.
- Per essere realmente efficaci, le misure anti-spam dovrebbero però essere adottate su larga scala e le legislazioni avere portata sovranazionale.

GLI UTENTI ADDESTRANO I SISTEMI DI DIFESA

I primi filtri anti-spam distribuiti dalla Microsoft elaboravano i dati ottenuti da appena 20 utenti, ma il perfezionamento delle tecniche di spamming ha reso necessaria una base di dati molto più ampia. Oggi sono 100.000 i volontari che contribuiscono a raccogliere i messaggi spazzatura. Questi utenti classificano una selezione casuale dei messaggi ricevuti come legittimi oppure indesiderati, facendo sì che il sistema impari nuovi bersagli da filtrare. Quando gli spammer trovano un modo per aggirare il filtro, basta poco tempo perché il sistema stabilisca come riconoscere, ed eliminare, i nuovi messaggi spazzatura.

Samuel Velasco

comparire insieme, come «clicca», «qui» e «cancella». Per chiarire meglio, mettiamo il caso che un modello Naive Bayes veda queste tre parole, che sono spesso associate allo spam. Può decidere di avere prove sufficienti per stabilire che tutti i messaggi che le contengono sono spazzatura, e cancellare anche e-mail valide. Al contrario, un modello sottoposto a training discriminativo saprebbe che le parole tendono ad apparire insieme e pertanto assegnerebbe loro un peso minore. Questo tipo di sistema potrebbe addirittura imparare che a una parola come «qui», che nello spam può capitare più spesso, non dovrebbe essere dato alcun peso perché non aiuta a stabilire se l'e-mail in questione sia vera o falsa. I metodi discriminativi possono addirittura scoprire che alcune parole si annullano reciprocamente. Anche se una parola come «umido» capita più spesso nello spam, quando appare insieme a «tempo», c'è la possibilità che il messaggio sia legittimo.

Un vantaggio dei sistemi Naive Bayes è che il loro addestramento è semplice. Determinare i pesi per i metodi discriminativi è invece molto più difficile: è necessario che i programmatori provino molti insiemi di valori di peso delle parole e di altre caratteristiche per trovare una combinazione che meglio di tutte riesca a distinguere lo spam dal non-spam. Fortunatamente i ricercatori hanno compiuto passi da gigante in questo senso. Algoritmi come SMO (*Sequential Minimal Optimization*), inventato da John Platt della Microsoft, e SCGIS (*Sequential Conditional Generalized Iterative Scaling*), del nostro collega Goodman, sono decine o centinaia di volte più veloci delle tecniche precedenti. Quando si ha a che fare con le quantità di dati del training anti-spam, con oltre un milione di messaggi e centinaia di migliaia di valori, avere a disposizione algoritmi più veloci è fondamentale.

Spam in agguato

Abbiamo sempre saputo che i sistemi ad apprendimento automatico basati sulle parole sono vulnerabili agli spammer che truccano la formulazione del loro messaggio. I più astuti, per esempio, hanno imparato a usare parole come «M0NEY» (con uno zero al posto della lettera «O») oppure a servirsi dei trucchi del linguaggio HTML (HyperText Markup Language), dividendo una parola in più parti (come «cl» e «ick» invece di «click»). Poiché i termini rivelatori non sono più presenti nel messaggio, il filtro si confonde. La buona notizia è che i sistemi ad apprendimento automatico imparano i trucchi e vi si adattano.

Purtroppo, abbiamo pensato che pochi utenti avrebbero risposto a un messaggio che cerca di sconfiggere un filtro anti-spam. Ci eravamo sbagliati: chi compra prodotti illeciti non si aspetta che i venditori si servano di tecniche pubblicitarie rispettabili. Così abbiamo dovuto alterare i sistemi usando quelli che i ricercatori chiamano modelli N-gram. Queste tecniche usano sottosequenze di vocaboli per trovare parole chiave spesso associate allo spam. Per esempio, se un'e-mail contiene la frase «n@ked l@dies», gli N-gram estratti da quella frase comprenderanno «<space>n@k», «n@ke», «@ked» e così via. Poiché quei frammenti di parola compaiono in messaggi già noti come spam, la loro presenza è un prezioso suggerimento.

Spazzatura per immagini

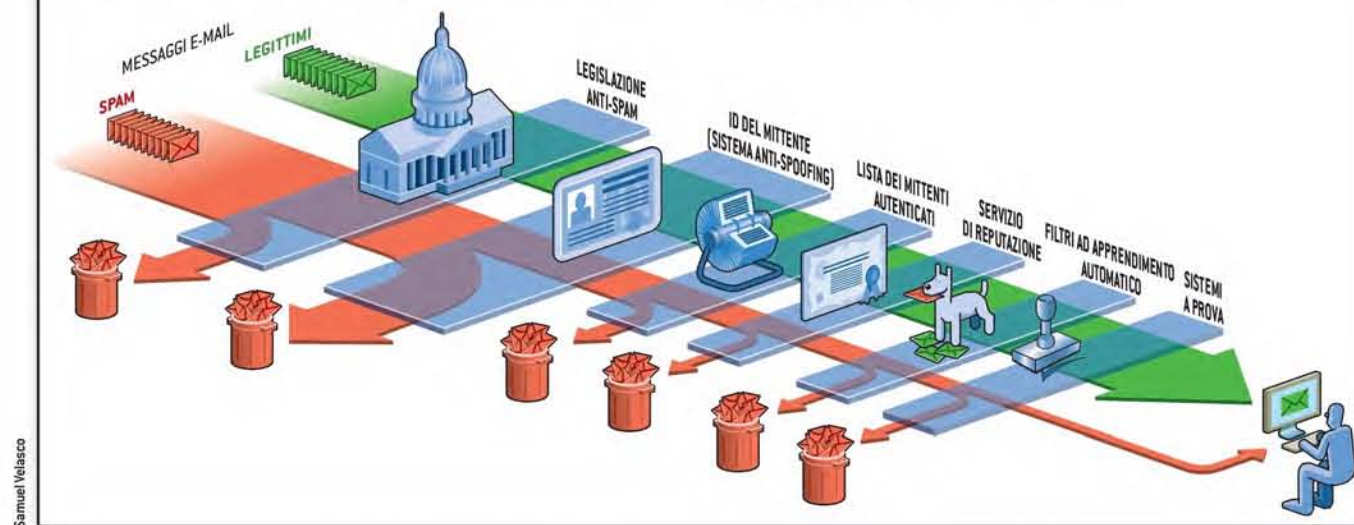
A volte gli spammer nascondono il loro messaggio in un'immagine il cui contenuto non può essere analizzato dai sistemi ad apprendimento automatico. Un promettente settore di ricerca è l'uso delle tecniche OCR (riconoscimento ottico dei caratteri) per il filtraggio dello spam. Le stesse tecniche usate per la scansione di un documento possono trovare tutto il testo nascosto nelle immagini e immetterlo in un filtro.

Uno degli aspetti più sgradevoli dello spam è la comparsa di immagini pornografiche nella casella di posta. Fortunatamente gli esperti di computer vision hanno fatto grandi progressi nell'individuazione automatica delle immagini pornografiche. La portata del lavoro in questo settore è davvero molto vasta, poiché va dalle applicazioni per prevenire l'accesso dei bambini a siti contenenti materiale sessuale a quelle per impedire ai porno-

UNIRE GLI SFORZI ANTI-SPAM

Per bloccare i messaggi indesiderati può essere necessario difendersi su più fronti, associando leggi che scoraggino la produzione di spam, tecnologie per scoprire i falsi mittenti, filtri intelligenti e sistemi a prova che diano la conferma che il mittente di un messaggio sia un essere umano o che rendano troppo costoso lo spamming.

La prima linea di difesa è legislativa. La recente legge degli Stati Uniti denominata CAN-SPAM proibisce alcune pratiche particolarmente sgradevoli, ma purtroppo finora non si è dimostrata un deterrente efficace.

Poiché quasi metà dei messaggi spazzatura usa falsi indirizzi di mittenti, il nuovo standard Sender ID Framework aggiunge informazioni supplementari al DNS (sistema di denominazione del dominio) elencando gli indirizzi IP dei computer autorizzati a inviare le e-mail da quel dato dominio. Il sistema e-mail di un computer controlla una «lista sicura» di mittenti autenticati che il destinatario considera attendibili. Se il mittente è sulla lista, il messaggio supera il filtro. In caso contrario, il messaggio potrebbe essere inviato a un «servizio di reputazione» per mittenti che hanno scelto di aderire a rigidi standard anti-spam. Se non appare in nessuna delle due liste, è filtrato da un sistema ad apprendimento automatico. Ai mittenti che risultano anche leggermente sospetti potrebbe essere quindi richiesto di provare di essere persone reali, per esempio risolvendo un quiz, un problema che richiede costoso tempo macchina oppure versando una piccola somma di denaro rimborsabile.

Samuel Velasco

grafi di abusare dei sistemi di *web hosting* gratuiti. Purtroppo però il riconoscimento delle immagini è ancora un processo molto lungo, e l'affidabilità dell'identificazione va migliorata. Per esempio, le immagini di bambini e bikini possono scatenare dei falsi positivi.

Per riconoscere lo spam, il nostro team sta facendo ricerche sull'analisi dell'URL (*Universal Resource Locator*), il codice che collega alle pagine web. Il 95 per cento dei messaggi spam contiene un URL. Il primo obiettivo di gran parte degli spammer è spingere gli utenti a visitare il loro sito web (anche se una piccola parte preferisce stabilire un contatto tramite numeri di telefono), per cui l'informazione URL è un obiettivo particolarmente adeguato per i filtri.

I filtri possono servirsi di questa informazione in molti modi. Alcune aziende di software anti-spam hanno già iniziato a bloccare le e-mail spazzatura che contengono link a pagine web già note per essere collegate allo spam. I link a domini sconosciuti possono essere considerati sospetti: gli spammer generano nuovi domini molto velocemente, mentre la maggior parte di quelli legittimi esistono da tempo. D'altro canto, l'informazione URL può essere anche un indicatore di e-mail legittime: un messaggio che contiene solamente dei puntatori a pagine conosciute e non collegate a spam ha molte meno probabilità di essere spam.

Dimostrami che sei umano

Anche se le tecniche di filtraggio funzionano abbastanza bene, sappiamo che gli spammer cercheranno sempre di attaccarle. Anziché provare a vincere questa gara senza fine, siamo convinti che nel lungo periodo l'approccio più efficace sia cambiare le regole del gioco. Per questo stiamo esplorando sistemi che richiedono il superamento di una prova, il cui obiettivo è chiedere allo spammer più di quanto può permettersi.

Come abbiamo detto, il primo messaggio spam di tutti i tempi fu inviato digitando manualmente tutti i 400 indirizzi e-mail. Oggi quasi tutto lo spam si propaga automaticamente, quindi se un mittente può dimostrare la sua identità umana, con tutta probabilità non si tratta di uno spammer. Uno dei primi sistemi a prova, suggerito da Moni Naor del Weizmann Institute of Science di Rehovot, in Israele, si è servito proprio di questo concetto. Naor propose di usare i cosiddetti HIP (*Human Interactive Proof*, prove di interazione umana), noti anche come CAPTCHA, un acronimo che sta per «test di Turing pubblici completamente automatizzati per distinguere i computer dagli esseri umani», o test di Turing inversi. L'HIP è un problema o un rompicapo progettato per risultare semplice alla maggior parte degli esseri umani,

COME FILTRARE (O NO) IMMAGINI PORNOGRAFICHE

FILTRI CONFUSIONARI. I sistemi automatici anti-pornografia destinati a filtrare ed eliminare le immagini sessualmente esplicite spesso confondono quelle innocue, come le due fotografie mostrate qui sopra, con altre più deplorevoli.

Joshua Goodman (a sinistra); Dan Guravich/Corbis (a destra)

ma il più difficile possibile per i computer. Le persone, per esempio, sono molto più abili delle macchine nel riconoscere all'interno di un'immagine gruppi casuali di lettere parzialmente oscurate o distorte.

L'HIP fa parte di un sistema *challenge-response* (sfida e risposta) per verificare se il mittente è realmente umano. Prima di consegnare un messaggio, il sistema controlla una lista di mittenti che il destinatario considera affidabili. Se il mittente è sulla lista, il messaggio è recapitato nella casella del destinatario, in caso contrario viene inviato un messaggio di «sfida» che chiede di risolvere un HIP.

Questo sistema interattivo può però risultare fastidioso per gli utenti: pochi hanno voglia di giocare agli indovinelli per spedire un'e-mail. Un meccanismo a prova alternativo e automatico, suggerito da Naor e dalla sua collega Cynthia Dwork, usa quesiti computazionali. Per riuscire a consegnare un messaggio, il sistema di posta elettronica del mittente deve anzitutto risolvere un problema computazionale posto dal sistema del destinatario. L'obiettivo è dimostrare che il mittente ha passato su quel singolo messaggio più tempo di quello che avrebbe potuto dedicarvi uno spammer che fa spedizioni di massa. I quesiti computazionali sono dei rompicapo tradizionali, difficili da risolvere ma facili da controllare. In media sono necessari diversi secondi o addirittura minuti per decifrarli. Per risolvere velocemente questi problemi, gli spammer dovrebbero acquistare molti computer, e i costi salirebbero a livelli proibitivi.

Un altro tipo di sistema a prova usa denaro vero. Il mittente inserisce nel messaggio una specie di assegno elettronico per una piccola somma, per esempio un centesimo. L'inclusione dell'assegno permette al messaggio di superare i filtri anti-spam. Se il messaggio è buono, il destinatario ignora l'assegno, ma se si tratta di posta indesiderata un meccanismo automatico consente al destinatario di incassare la somma (o devolverla in beneficenza). Nel frattempo un software di *rate limiting* (limitazione di velocità) controlla il volume dei messaggi spediti dai mittenti, in modo che non mandino più e-mail di quelle permesse dal loro saldo. Per gli utenti legittimi questo sistema è gratuito, ma per gli spammer il costo può essere di un centesimo di dollaro a messaggio, ovvero 100 volte la nostra stima del costo attuale, una somma molto superiore a quanto uno spammer può permettersi. Per i privati, può esservi anche un piccolo deposito virtuale creato dal loro fornitore di servizi Internet oppure quando acquistano il programma di posta elettronica; in tal modo il sistema sarebbe gratuito per la maggior parte degli utenti.

Anche se teoricamente molto diretti, questi metodi monetari non saranno però facili da mettere in pratica. I sistemi elettronici richiedono una certa spesa generale, e quindi queste transazioni non sarebbero gratuite. Molte domande sull'infrastruttura bancaria per il micropagamento rimangono senza risposta: da dove proverrà il denaro per eseguire i pagamenti? Come si sosterranno tali operazioni, e chi trarrà i profitti? Chi riscuoterà i pagamenti, e in che modo il sistema eviterà le frodi? Anche se nessuno di questi problemi è irrisolvibile, l'attuazione di un simile schema si presenta piuttosto ardua.

Attacco da più fronti

La nostra strategia preferita per arrestare lo spam unisce la tecnologia di filtro delle e-mail con vari test di prova: HIP, quesiti computazionali e micropagamenti. Con questo approccio, se il mittente non rientra nella lista autenticata dal destinatario il messaggio è deviato a un filtro anti-spam basato sull'apprendimento automatico e progettato per essere molto aggressivo; se l'e-mail è anche leggermente sospetta, il destinatario viene sfidato a risolvere una prova. Tuttavia, molti dei messaggi da una persona all'altra non saranno contestati, il che riduce il numero delle prove. Al mittente sono date due opzioni: risolvere un HIP o un puzzle computazionale, oppure eseguire un micropagamento. Se il computer del mittente ha un software più aggiornato, comincerà a risolvere il problema automaticamente. In caso contrario il mittente dovrà risolvere l'HIP o eseguire un micropagamento.

GLI AUTORI

JOSHUA GOODMAN, DAVID HECKERMAN e ROBERT ROUNTHWAITE collaborano da anni a sistemi di difesa dallo spam. Nel 1997 Heckerman e Rounthwaite, insieme ad altri, hanno progettato il primo filtro anti-spam basato sull'apprendimento automatico. Heckerman gestisce il gruppo MLAS (Machine Learning and Applied Statistics) presso Microsoft Research. Goodman e Rounthwaite hanno contribuito a sviluppare le tecnologie anti-spam dei programmi Microsoft Exchange, Outlook, MSN e Hotmail. Goodman è membro del team MLAS ed esegue ricerche sullo spam e su altri aspetti relativi alle e-mail.

PER APPROFONDIRE

DUDA R.O., HART P.E. e STORK D.G., *Pattern Classification*, Wiley-Interscience, 2000.

ANDROUTSOPOULOS I., PALIOURAS G. e MICHELAKIS E., *Learning to Filter Unsolicited Commercial E-Mail*, Relazione tecnica 2004/2, NCSR Demokritos, disponibile all'indirizzo: http://iit.demokritos.gr/~paliourg/papers/TR2004_updated.pdf.

MCWILLIAMS B.S., *Spam Kings: The Real Story behind the High-Rolling Hucksters Pushing Porn, Pills and %*@)# Enlargements*, O'Reilly, 2004.

GOODMAN J., *Spam Wars: Our Last Best Chance to Defeat Spammers, Scammers and Hackers*, Select Books, 2004.

AA.VV., *First and Second Conferences on Email and Anti-Spam*; atti disponibili a: www.ceas.cc.

Ma una singola azienda o istituzione, per quanto grande sia, non potrà evolversi più di tanto contro lo spam, poiché è necessaria una soluzione globale che richieda la collaborazione di tutta l'industria informatica e dei software, nonché dei governi nazionali.

Circa due terzi di tutte le e-mail attuali usa mittenti truccati (*spoofed*), cioè falsi. I protocolli e-mail oggi si basano sulla fiducia: i mittenti dicono chi sono e i destinatari ci credono, un sistema che funzionava bene prima che lo spam proliferasse e le e-mail fossero usate per transazioni d'affari. Cambiare gli standard Internet è notoriamente difficile, soprattutto i protocolli e-mail. Tuttavia, un nuovo standard industriale, il Sender ID Framework, sta finalmente affrontando il problema dello *spoofing*. Lo standard aggiunge informazioni supplementari al sistema di denominazione del dominio (DNS) in modo da elencare gli indirizzi IP da cui può provenire l'e-mail inviata da quel dominio. Gli indirizzi IP sono numeri – per esempio «1.2.3.4.» – che funzionano un po' come indirizzi stradali per i computer. La lista DNS di voci per un dato dominio (per esempio, *example.com*) determina gli indirizzi IP autorizzati a inviare e-mail da quel dominio. Se uno spammer finge di essere *example.com*, il suo indirizzo IP non corrisponderà a nessuno di quelli nell'elenco di *example.com* di Sender ID, e il programma di posta elettronica saprà che l'e-mail è falsa.

Anche se conoscere l'identità del mittente è un passo importante per prevenire le frodi, non risolverà il problema dello spam. Non c'è nulla che impedisca agli spammer di creare nuove identità ogni giorno, o addirittura ogni minuto. Ecco perché saranno fondamentali i cosiddetti *reputation service*, o «servizi di reputazione», attraverso cui i mittenti possono certificare la loro legittimità. Per esempio, nel caso del programma Bonded Sender, prodotto da IronPort, i mittenti depositano denaro come garanzia. Se la percentuale dei reclami provenienti dai mittenti supera una certa soglia, la garanzia è donata in beneficenza. I filtri anti-spam possono controllare la lista di Bonded Sender e permettere all'e-mail di un mittente certificato di superare il filtro anti-spam anche se appare sospetta. Questi programmi possono funzionare anche per chi invia pochi messaggi. Un fornitore di servizi Internet come MSN o AOL può aderire a un «servizio di reputazione» per accedere al suo programma di certificazione, in modo da controllare il volume di e-mail e la percentuale di reclami di ogni suo abbonato, assicurando che nessuno di essi sia uno spammer.

Se la maggior parte dei mittenti legittimi adottasse questo sistema, i filtri anti-spam potrebbero occuparsi in modo molto più aggressivo delle altre e-mail, e quindi bloccare la maggior parte dei messaggi spazzatura. I sistemi di reputazione potrebbero essere uniti ai sistemi a prova, in modo tale che chi non può aderirvi disponga di un metodo alternativo per inviare la posta.

Un approccio complementare contro lo spam è la legislazione. Nel gennaio 2004 negli Stati Uniti è entrata in vigore la legge CAN-SPAM. La legge di per sé non dichiara illegale lo spamming: proibisce solo alcune tecniche particolarmente deplorevoli, come l'uso di mittenti falsi. Sfortunatamente, finora ha avuto pochi effetti: dopo la sua entrata in vigore, la percentuale di spam con indirizzo falso del mittente è passata dal 41 al 67 per cento. I paesi europei hanno invece varato leggi molto più severe, che impediscono l'invio di e-mail commerciali senza il permesso esplicito del destinatario. Secondo fonti non confermate, queste leggi si sono dimostrate in certa misura efficaci nel fermare almeno lo spamming praticato da grandi aziende. È comunque evidente che una legislazione esclusivamente nazionale non può sperare di metter fine allo spam.

Un futuro senza spazzatura

Il settore informatico, la comunità del software *open source* e quella accademica continuano a studiare metodi per eliminare lo spam. Recentemente abbiamo collaborato all'organizzazione della prima conferenza ufficiale sull'argomento, che ha attirato ricercatori provenienti da tutto il mondo. Gli ingegneri dell'IBM hanno mostrato come riconoscere gli schemi nello spam usando tecniche mutuate dalla bioinformatica, originariamente progettate per studiare i geni. I ricercatori di AOL hanno dimostrato che i sistemi multipli di verifica del fingerprint su diversi elenchi di vocaboli possono offrire una difesa migliore contro i trucchi degli spammer. Un team dell'Università della California a Davis ha dimostrato che l'aggiunta di alcune parole comuni può produrre un attacco efficace contro i filtri anti-spam basati sull'apprendimento automatico e come, attraverso l'addestramento, quei filtri possano essere resi più resistenti a tale attacco.

Siamo certi che alla fine la combinazione delle tecniche attuali e di quelle di prossima generazione trionferà sullo spam. Naturalmente, ci sarà sempre qualche spammer disposto a pagare il prezzo necessario per entrare nella vostra casella postale, ma a quel punto l'alluvione si sarà trasformata in un rivolo. LS

LA PRIMAVERA DEI SUPER CONDUTTORI

Fino a pochi anni fa i fisici pensavano che i superconduttori ordinari non potessero superare temperature critiche piuttosto basse. Ma oggi un nuovo composto straccia il primato precedente e si candida per un futuro di importanti applicazioni

di Paul C. Canfield e Sergey L. Bud'ko

FILI COMPATTI. Una sezione lucidata di un filo di diboruro di magnesio mostra che il filo è essenzialmente denso al 100 per cento ed è costituito da piccoli grani non orientati che riflettono la luce in modo diverso, dando origine a vari colori. Questi fili sono utili per la ricerca di base sulla superconduttività del materiale. Il filo ha un diametro di 0,14 millimetri.

Hal Salisbury, Materials Preparation Center, Ames Laboratory

Immaginatevi di camminare nel vostro giardino e scoprire improvvisamente una vena d'oro in un angolo che pensavate di conoscere bene, e dove – fino al giorno prima – vi pareva che non ci fosse davvero nulla di interessante. Una simile sensazione di eccitazione si sparse nella comunità dei fisici dello stato solido nelle prime settimane del 2001, quando alcuni ricercatori annunciarono che il diboruro di magnesio (MgB_2) è superconduttore – vale a dire conduce corrente elettrica senza resistenza – a temperature prossime ai 40 kelvin. Questo semplice composto era stato studiato fin dagli anni cinquanta, e per decenni lo si era trovato sugli scaffali dei laboratori per gli scopi più disparati senza che nessuno sospettasse il suo prezioso talento nascosto. Sebbene 40 kelvin (cioè –233 gradi Celsius) possano sembrare una temperatura piuttosto bassa, era quasi il doppio del precedente record per un composto a base di metalli (circa 23 kelvin per le leghe di niobio, che sono largamente usate nella ricerca e nell'industria). Una temperatura di transizione così alta, peraltro, può essere raggiunta con tecnologie molto meno costose di quelle necessarie per ottenere superconduttività nelle leghe di niobio. Le applicazioni possibili vanno dai magneti superconduttori alle linee elettriche.

A differenza dei superconduttori ad alta temperatura (materiali a base di ossido di rame, che superconducono a temperature fino a 130 kelvin), MgB_2 sembra essere un superconduttore tradizionale, anche se di un nuovo tipo. Nella loro lunga ricerca di superconduttori con temperature di transizione sempre più alte, i fisici hanno sviluppato regole di massima sulle combinazioni di elementi che era opportuno testare. Molti sospettavano che i 23 kelvin delle leghe di niobio fossero vicini alla massima temperatura di transizione per un superconduttore tradizionale. E invece MgB_2 ha infranto le regole, spostando la barriera verso temperature più alte.

La velocità con cui è cresciuta la comprensione di MgB_2 è incredibile. Jun Akimitsu, della Aoyama Gakuin University di Tokyo, annunciò la scoperta a un congresso a metà del gennaio 2001. Appena due mesi dopo, a marzo, durante il congresso annuale della American Physical Society, furono presentati circa 100 interventi di due minuti ciascuno sull'argomento, mentre più di 70 articoli di ricerca erano stati inviati elettronicamente all'archivio di preprint arxiv.org. Questa esplosione di attività avvenne per due ragioni. Prima di tutto, una volta che si è capito come, è piuttosto facile produrre MgB_2 relativamente puro. In secondo luogo, nel 2001 la comunità dei fisici della materia condensata era interconnessa attraverso Internet come mai prima di allora. Questi due ingredienti, combinati con la promessa di un superconduttore nuovo e semplice, con un'elevata temperatura di transizione, formarono una miscela intellettuale esplosiva.

Confermare la scoperta

All'inizio, la notizia della scoperta si diffuse soprattutto via e-mail. Non era disponibile alcun articolo di ricerca o bozza elettronica in materia. Quando venimmo a saperlo, pochi giorni dopo il congresso, ci facemmo una serie di domande: possiamo produrre diboruro di magnesio solido e molto puro? (Normalmente, MgB_2 è una polvere piuttosto piena di impurità.) È davvero superconduttore a temperature vicine ai 40 kelvin? (Venivamo da vent'anni di USO, cioè «oggetti superconduttori non identificati», composti per cui venivano annunciate temperature di transizione esageratamente alte, che regolarmente non si riuscivano a riprodurre.) Se MgB_2 è davvero superconduttore, possiamo scoprire il meccanismo di questa superconduttività? E, infine, possiamo delineare alcune delle proprietà di base di questo composto? Per nostra fortuna, tutte queste domande avevano una risposta affermativa.

Le voci della scoperta di Akimitsu diedero inizio a un periodo frenetico e meraviglioso, per noi e per altri gruppi di ricerca. Il nostro gruppo è specializzato nello studio delle proprietà fisiche dei composti metallici, perciò non appena sentimmo della sua relazione al congresso ci sbarazzammo di tutti gli esperimenti già in corso e iniziammo a tentare di produrre MgB_2.

All'inizio ottenere il composto era piuttosto difficile. Il diboruro di magnesio è un composto intermetallico, ovvero una sostanza costituita da due o più elementi metallici. Il metodo più semplice per ottenere questi composti – semplicemente fondendo insieme gli elementi – era impraticabile, perché boro e magnesio hanno punti di fusione molto diversi: 650 gradi per il magnesio e oltre 2000 per il boro. Poiché bolle a poco più di 1100 gradi, il magnesio evaporerebbe prima che si possa formare il composto.

Ma l'evaporazione del magnesio ci suggerì un metodo alternativo: potevamo sigillare un frammento di magnesio e un po' di polvere di boro in un contenitore di tantalio, che è inerte, e portare il tutto a una temperatura abbastanza alta da far fondere, ma non bollire, il magnesio (intorno ai 950 gradi, per esempio). Il magnesio ha una tensione di vapore relativamente alta; a 950 gradi circa un terzo di atmosfera di vapori di magnesio è in equilibrio con il metallo liquido. Ci aspettavamo che questo denso vapore si sarebbe diffuso nel bo-ro metallico, producendo palline di MgB_2. E infatti in appena due ore questo processo produceva MgB_2 molto puro sotto forma di palline leggermente sinterizzate (un materiale simile all'arenaria). A tre giorni da quando avevamo appreso la notizia, avevamo prodotto il composto e potevamo confermarne la superconduttività a quasi 40 kelvin.

Avendo scoperto come produrre MgB_2 e avendo confermato che è un superconduttore, passammo alla domanda successiva: era un superconduttore di vecchio tipo, la cui attività può essere spiegata con una teoria assodata come il modello BCS (*si veda il box a p. 106*), o qualcosa di più esotico? Nel secondo caso saremmo stati davanti a una scoperta scientifica di profondo significato. Se invece si fosse trattato di un normale superconduttore BCS, allora bisognava spiegarne l'eccezionale temperatura di transizione, ma le prospettive di poterlo usare in applicazioni pratiche sarebbero state più incoraggianti.

Per molte ragioni, alcuni ricercatori pensavano che MgB_2 non fosse un superconduttore BCS standard. Innanzitutto, prima che nel 1986 si scoprissero i superconduttori ad alta temperatura, le temperature di transizione più alte erano ferme attorno a 20 kelvin da vent'anni. Questo fatto aveva portato alcuni teorici a suggerire che nei composti che obbedivano alle regole della teoria BCS la temperatura di transizione più alta possibile fosse di circa 30 kelvin. I superconduttori ad alta temperatura a base di ossidi di rame eccedevano di gran lunga questo limite, ma non si pensava che fossero superconduttori BCS.

Si trattava di un superconduttore standard o eravamo davanti a qualcosa di più esotico?

In secondo luogo, la temperatura di transizione, o temperatura critica (T_c), relativamente alta di MgB_2 violava una dalle vecchie regole empiriche della ricerca di composti intermetallici che avessero una T_c più alta: più sono gli elettroni che possono partecipare alla transizione di fase verso lo stato superconduttore, più alta è la temperatura di transizione. Né il magnesio né il boro potevano cedere a MgB_2 un numero di elettroni particolarmente alto.

Ma c'è una verifica sperimentale molto diretta per dire se un superconduttore segue la teoria BCS. Nella teoria svolgono un ruolo chiave le vibrazioni del reticolo cristallino del materiale. Immaginate che i pesanti ioni positivi del reticolo siano tenuti al loro posto da forti molle (i legami chimici). Le eccitazioni, come il calore, si manifestano come vibrazioni di singoli ioni a frequenze caratteristiche. La teoria BCS prevede che la temperatura di transizione di un superconduttore sia proporzionale alla frequenza delle vibrazioni del suo reticolo. Gli oggetti fatti di materiali di massa inferiore hanno frequenze caratteristiche più alte rispetto a oggetti identici ma costituiti da materiali di massa maggiore. Usando diversi isotopi di magnesio o di boro possiamo produrre MgB_2 con atomi di massa diversa, che influenzano la frequenza di vibrazione del reticolo, che a sua volta altera T_c in un modo caratteristico.

Il boro ha due isotopi stabili naturali, il boro 10 e il boro 11. La più semplice previsione del modello BCS è che T_c dovrebbe differire di 0,85 kelvin per i due campioni di MgB_2 fatti con l'uno o con l'altro isotopo. Con i nostri primi campioni, abbiamo registrato uno spostamento di un kelvin. Il fatto che la differenza sia leggermente più grande del previsto può essere spiegato dalla teoria BCS: indica che per la superconduttività le vibrazioni del boro sono più importanti di quelle del magnesio.

La vicinanza del nostro risultato al valore previsto di 0,85 kelvin rivelò che probabilmente MgB_2 è un superconduttore BCS, anche se estremo, con una temperatura di transizione molto più alta di ogni altro. Evidentemente le previsioni teoriche di un limite superiore di 30 kelvin per la superconduttività BCS non erano valide. E questa era una buona notizia, perché i superconduttori metallici BCS standard sono molto più semplici da lavorare e vi si possono produrre fili molto più facilmente che con i superconduttori a base di ossido di rame. In verità, ci accorgemmo improvvisamente che potevamo produrre fili di MgB_2 semplicemente esponendo filamenti di boro ai vapori di magnesio. Per molte misure, e per applicazioni pratiche come la produzione di magneti, i fili sono molto più utili delle palline sinterizzate.

Ma a che serve?

La superconduttività si manifesta solo a temperature molto basse, ma può avere parecchie applicazioni. Una delle più ovvie deriva dalla capacità dei supercon-

FARE FILI

Norman E. Anderson, Jr.

I FILI sono stati ottenuti facendo reagire vapori di magnesio e filamenti di boro.

Hal Sailsbury, Materials Preparation Center, Ames Laboratory

LA SEZIONE di un filo di diboruro di magnesio rivela un nucleo centrale di boruro di tungsteno del diametro di 0,015 millimetri.

Entro un paio di settimane dall'annuncio della superconduttività di MgB_2, avevamo ideato una tecnica per produrre fili di questo notevole superconduttore. Il diboruro di magnesio si può ottenere facendo reagire i vapori di magnesio con il boro, un processo che avviene in poche ore a temperature vicine ai 1000 gradi Celsius: il boro, in sostanza, aspira il vapore di magnesio dall'ambiente e diventa MgB_2 (gonfiandosi notevolmente nel processo). Questo processo funziona bene con le fibre di boro, che si trovano in commercio anche in lunghezze di centinaia di metri, ed è stato applicato a fili con diametri da 0,1 a 0,3 millimetri.

Questi spezzoni di filo permettono di misurare le proprietà fisiche intrinseche del MgB_2. Prima di poterli usare in applicazioni pratiche, però, dovranno avere una guaina conduttrice malleabile, che può trasportare la corrente se vengono meno le condizioni perché si abbia superconduttività, impedendo un riscaldamento catastrofico del MgB_2. Purtroppo non è ancora stata sviluppata una guaina adatta.

Una tecnica più comune per produrre i tubi consiste nel mettere polvere di boro e magnesio, o di diboruro di magnesio, in un tubo, e stirarlo fino a farlo diventare un filo, per poi ottenere una struttura solida con l'annealing. Questa tecnica ha prodotto campioni sperimentali lunghi da decine a centinaia di metri. Nonostante MgB_2 sia un superconduttore di recente scoperta, molte aziende sono già al lavoro per metterlo in commercio. Tra queste si annoverano la Diboride Conductors e la Hyper Tech Research, piccole imprese che stanno cercando di produrre fili di MgB_2 e migliorarne le proprietà, e la Specialty Materials, un'azienda più grande che si occupa di materiali e ha esperienza nella produzione di fili di boro.

In sintesi/*Qualità insospettate*

- Nel 2001 un gruppo di ricerca giapponese scoprì che il diboruro di magnesio, un composto apparentemente privo di caratteristiche degne di nota, diventa superconduttore a circa 40 kelvin, una temperatura critica doppia rispetto a materiali simili. La sua temperatura utile per le applicazioni è tra i 20 e i 30 kelvin.
- Queste temperature possono essere raggiunte con un raffreddamento a base di idrogeno liquido o neon liquido oppure mediante refrigerazione a ciclo chiuso, tecniche molto più economiche e più semplici del raffreddamento a base di elio liquido necessario per raggiungere i circa 4 kelvin a cui funzionano le leghe di niobio, che sono comunemente usate in ambito industriale.
- Quando viene drogato con carbonio o altre impurità, il diboruro di magnesio ha prestazioni uguali o addirittura superiori alle leghe di niobio nel mantenere la sua superconduttività in presenza di campi magnetici o quando trasporta una corrente elettrica. La potenziali applicazioni di questo composto comprendono magneti superconduttori, linee elettriche di potenza e sensibili rivelatori di campo magnetico.

BREVE STORIA DELLA SUPERCONDUTTIVITÀ

Heike Kamerlingh Onnes scoprì la superconduttività nel 1911, quando utilizzò l'elio liquido come refrigerante per studiare le proprietà elettriche dei metalli a bassa temperatura. Con grande sorpresa di tutti, quando fu raffreddato a circa 4,2 kelvin, il mercurio perse improvvisamente la sua resistenza elettrica. Questa soglia è nota come temperatura critica, o T_c.

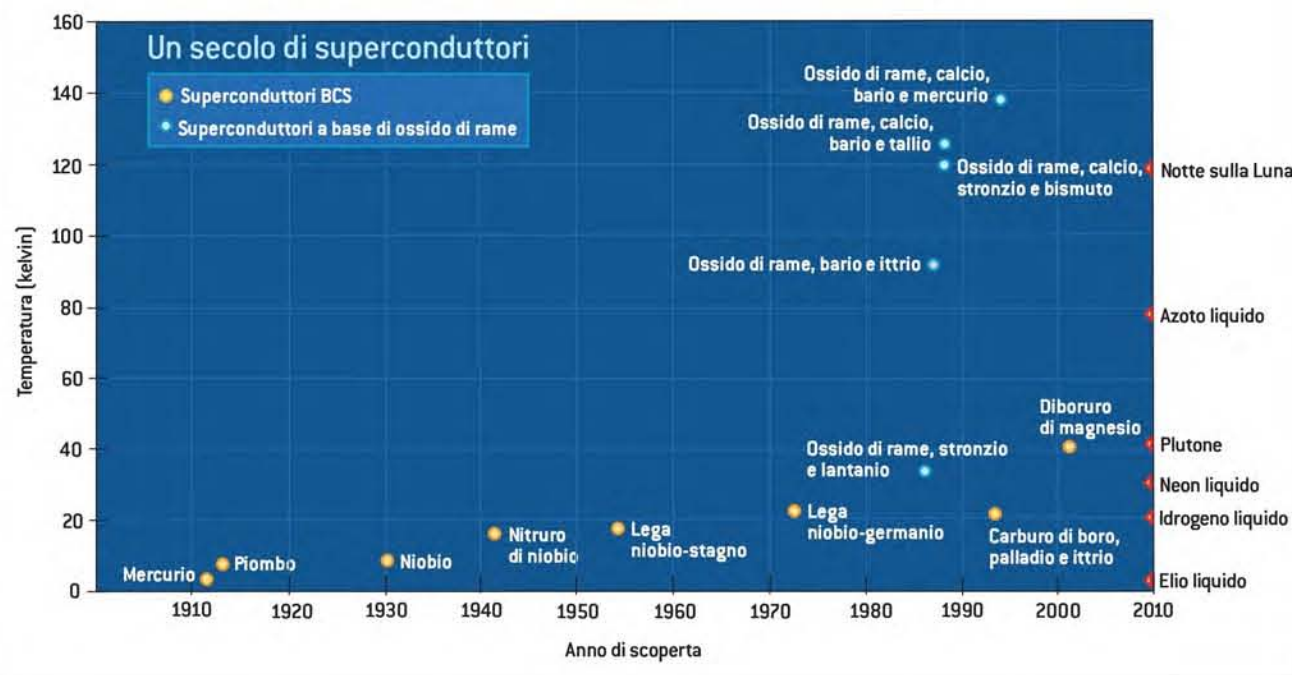
Nei primi cinquant'anni di ricerca sulla superconduttività, furono via via scoperti materiali con temperature critiche sempre più elevate. Tutti questi superconduttori erano o metalli puri o composti intermetallici (fatti di due o più elementi metallici). Ma dagli anni sessanta fino a metà degli anni ottanta il valore massimo di T_c sembrava non poter superare i 20 kelvin, o poco più.

Le cose cambiarono nel 1986, con la scoperta della superconduttività ad alta temperatura in un grande numero di composti a base di ossido di rame. Negli anni che seguirono, i valori della temperatura critica sono decollati, con l'ossido di mercurio-bario-calcio-rame che ha una T_c di circa 130 kelvin. È stato un periodo molto stimolante per la ricerca in questo settore, ma presto fu chiaro che la teoria della superconduttività più accreditata – la teoria BCS – non può spiegare l'assenza di resistenza in questi materiali. Nonostante quasi vent'anni di sforzi, non c'è ancora una teoria definitiva che spieghi come e perché i composti di ossido di rame siano superconduttori.

Questi composti pongono anche numerose sfide tecniche. Inizialmente erano molto difficili da produrre, sia nella forma ad alta purezza sia come monocristalli, e ciò complicava la misurazione delle loro proprietà fondamentali. Inoltre, la sintesi dei fili non era semplice: a differenza dei superconduttori intermetallici, i singoli grani che formano questi ossidi devono essere allineati gli uni con gli altri affinché il filo sia utilizzabile a fini pratici. Questi problemi hanno fatto sperare a fisici e ingegneri di trovare una sostanza con proprietà materiali in qualche modo più facili dei superconduttori intermetallici, e che a loro volta avessero una temperatura critica significativamente più alta di 20 kelvin.

All'alba del nuovo millennio, lo stato superconduttore poteva essere ottenuto con vari gradi di facilità e di spesa. Negli ossidi, la superconduttività era utilizzabile vicino ai 77 kelvin, che possono essere raggiunti piuttosto facilmente immergendo il materiale in azoto liquido. I composti intermetallici più vecchi, come la lega niobio-stagno – che funzionavano a temperature vicine ai 4 kelvin, raggiungibili con l'elio liquido – venivano usati nei laboratori e in applicazioni di interesse medico.

La scoperta del 2001 che il semplice composto intermetallico diboruro di magnesio superconduce a 40 kelvin, circa il doppio della temperatura degli altri composti intermetallici, era quasi esattamente quello che si sperava.

Tommy Moorman and Carli Morgenstein

duttori di trasportare grandi correnti elettriche senza perdere energia per il riscaldamento dovuto alla resistenza. I magneti superconduttori possono produrre campi magnetici di oltre 20 tesla, sono usati nei laboratori e nelle apparecchiature per la risonanza magnetica e hanno un mercato in continua crescita.

Un'altra applicazione che è stata proposta sono le linee elettriche di distribuzione senza dispersione, che possono trasportare densità di corrente molto più elevate di quelle non superconduttrici. A oggi, i ricercatori hanno sperimentato con successo diversi prototipi a base di ossido di rame, che sono stati raffreddati fino a temperature prossime ai 70 kelvin in azoto liquido.

In generale, per comportarsi da superconduttori in applicazioni pratiche, i composti devono essere raffreddati ben al di sotto della loro temperatura critica, perché altrimenti grandi correnti elettriche o intensi campi elettrici farebbero perdere la superconduttività al materiale. Una temperatura critica di 20 kelvin, perciò, corrisponde a una temperatura operativa di 10; il che significa che il superconduttore deve essere raffreddato con elio liquido, un'operazione costosa e complicata.

La comunità che si occupa di ricerca applicata è interessata a MgB_2 perché questo materiale può essere raffreddato a temperature operative accettabili molto più facilmente delle leghe a base di niobio e degli altri composti che vengono usati oggi. Il diboruro di magnesio può essere raffreddato a buon mercato usando idrogeno o neon liquido, o mediante raffreddamento a circuito chiuso, tecniche che possono raggiungere rapidamente temperature inferiori ai 20 kelvin.

Ma perché questa speranza diventi realtà è necessario che MgB_2 abbia buone proprietà di superconduttore. I ricercatori stanno prestando particolare attenzione alle fasi miste del superconduttore, in cui un campo magnetico altera parzialmente la superconduttività: nella maggior parte delle applicazioni concrete, il materiale si troverà in questa fase. Campi magnetici deboli non producono lo stato misto; il materiale esclude il campo e rimane superconduttore. Per campi intermedi, invece, il materiale permette al campo magnetico di penetrare sotto forma di piccoli tubi di flusso magnetico, chiamati vortici. L'interno di questi tubi non è superconduttore, ma all'esterno di essi il materiale continua a condurre elettricità senza offrire resistenza. Questa fase mista manifesta ancora molte delle caratteristiche utili della superconduttività. Quando la forza del campo applicato cresce, aumenta la percentuale di materiale occupato dai tubi di flusso, fino a quando i tubi si sovrappongono completamente: a quel punto il materiale non è più superconduttore. L'intensità del campo a cui si perde la superconduttività viene chiamata campo critico superiore ed è una proprietà chiave che determina quanto un superconduttore sarà utile in pratica.

La maggior parte delle applicazioni implicherà la presenza di campi intermedi (il campo è abbastanza forte da essere utile ma non è tale da distruggere la superconduttività), così l'obiettivo diventa massimizzare l'intervallo di temperature e campi magnetici in cui sopravvive la fase mista superconduttrice. Anche la temperatura ha un ruolo in queste considerazioni, perché il campo critico superiore di un superconduttore varia con essa. Appena sotto T_c, il campo critico superiore è prossimo a zero, cioè anche il più debole campo magnetico distrugge la superconduttività. A temperature più basse la superconduttività può sopravvivere a campi più intensi.

Fortunatamente, il campo critico superiore di un materiale può essere regolato producendo il composto in modi diversi, di solito aggiungendo impurità. Per esempio, quando un po' di boro viene sostituito con carbonio, il campo critico migliora notevolmente. Il nostro e altri gruppi hanno dimostrato che sostituendo il cinque per cento del boro con carbonio il campo critico può essere più che raddoppiato.

Il gruppo di David C. Larbalestrier, dell'Università del Wisconsin a Madison, ha invece mostrato che i film sottili di MgB_2 hanno valori ancora più alti di campo critico superiore, ben al di sopra di quelli della lega niobio-stagno (Nb_3Sn). I dati dei film sottili sono un mistero: da che cosa hanno origine gli alti valori di campo critico? Dipendono da piccole quantità di ossigeno? O c'è qualche altro elemento che si infila nella lega drogandola in modi sconosciuti? C'è una tensione nella struttura di MgB_2? Quali che siano le risposte a queste doman-

MIGLIORARE LE PRESTAZIONI

Riuscire a mantenere la superconduttività quando il materiale sta trasportando un'intensa corrente elettrica e in presenza di un campo magnetico è fondamentale per le applicazioni. I dati dei grafici mostrano come, drogando il diboruro di magnesio con impurità, siano migliorate le sue prestazioni, che ora eguagliano o superano quelle della lega niobio-stagno, il superconduttore preferito dall'industria (Nb_3Sn). Il grafico a sinistra mostra che gli spezzoni di filo di MgB_2 drogati con il carbonio e un film sottile di MgB_2 con un livello di impurità ignoto sopportano un campo magnetico più intenso («campo critico superiore») di Nb_3Sn a tutte le temperature. I dati a destra (presi a 4 kelvin eccetto dove specificato) mostrano che MgB_2 drogato con carburo di silicio (SiC) eguaglia la capacità di trasportare la corrente di Nb_3Sn, ma altre varianti sono notevolmente inferiori. Le linee tratteggiate sono interpolazioni.

Lucy Reading-Ikkanda

GLI AUTORI

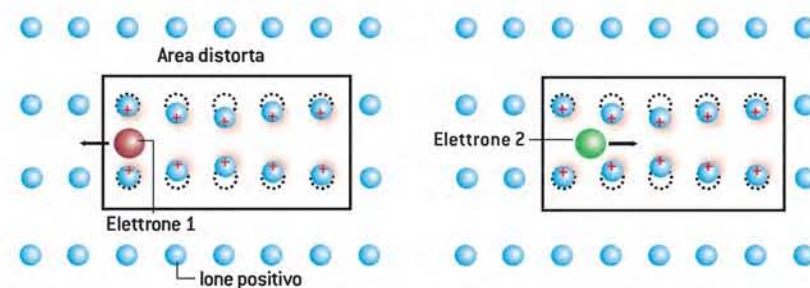
PAUL C. CANFIELD e SERGEY L. BUD'KO lavorano entrambi allo Ames Laboratory del Department of Energy statunitense, in Iowa. Canfield è anche professore di fisica e astronomia alla Iowa State University. La sua ricerca si concentra sulla progettazione, la scoperta, la crescita e la caratterizzazione di materiali e fenomeni nuovi, principalmente dedicandosi agli stati elettronici e magnetici dei composti metallici alle basse temperature. Gli interessi di ricerca di Bud'ko comprendono la termodinamica e le proprietà di trasporto elettrico e magnetico dei nuovi materiali, le oscillazioni quantistiche nei metalli e nei semimetalli e le proprietà fisiche dei materiali in condizioni estreme che combinano alta pressione, intensi campi magnetici e basse temperature.

Gli autori desiderano riconoscere la loro fruttuosa collaborazione con R. Wilke, D. Finnemore, C. Petrovic, G. Lapertot, R. Ribeiro e N. Anderson. Il loro lavoro ha avuto il supporto del direttore per la ricerca energetica dell'Office of Basic Energy Sciences.

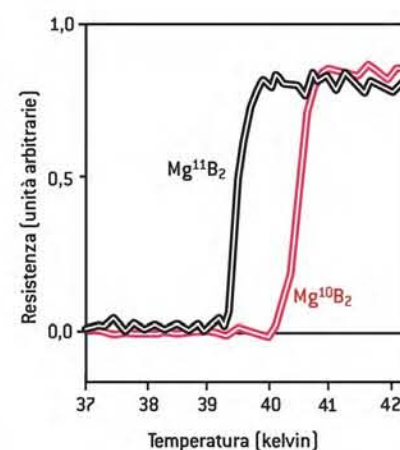
LA TEORIA BCS

Una delle domande chiave a proposito della superconduttività è: perché avviene? Vale a dire, quale meccanismo o interazione provoca la transizione in questo nuovo stato? Nel 1957 i fisici John Bardeen, Leon N. Cooper e J. Robert Schrieffer proposero una spiegazione del meccanismo alla base della superconduttività dei metalli in una teoria che porta le loro iniziali. In un metallo normale, non superconduttore, gli elettroni vengono diffusi dai difetti e dalle imperfezioni, generando la resistenza. Secondo la teoria BCS, la superconduttività avviene quando gli elettroni agiscono invece come un'unica entità collettiva che si può muovere senza dispersione.

I blocchi di costruzione di questo nuovo stato elettronico sono coppie di elettroni, le coppie di Cooper, i cui partner sono debolmente attratti l'uno con l'altro. Questa attrazione tra particelle della stessa carica elettrica, impossibile per le leggi dell'elettrostatica classiche, si ha perché il metallo è composto di ioni positivi, oltre che di elettroni. Quando un membro della coppia si muove attraverso il metallo, lascia nella sua scia una distorsione ionica carica positivamente. Questa temporanea carica positiva netta attrae un secondo elettrone. In questo modo, la distorsione del reticolo accoppia debolmente gli elettroni. (Più precisamente, sono coinvolte nell'accoppiamento le vibrazioni del reticolo di una specifica frequenza.) Un'analogia è quella di due persone che saltano su un materasso elastico. Anche se non c'è attrazione diretta fra le due persone, esse tendono a rimbalzare l'una verso l'altra per via della distorsione che si produce nel tappeto sotto i loro piedi.

RETICOLO DI MATERIALE SUPERCONDUTTORE

È LA FORMAZIONE DI COPPIE DI ELETTRONI, chiamate coppie di Cooper, che porta alla superconduttività. Un elettrone lascia nella sua scia una distorsione del reticolo di ioni carichi positivamente di un metallo (*a sinistra*). Poco dopo, il secondo elettrone viene attratto dalla concentrazione di carica positiva risultante (*a destra*). Agli effetti pratici, gli elettroni sono debolmente attratti l'uno verso l'altro.

Le coppie di Cooper si sovrappongono l'una all'altra e, al di sotto della temperatura critica (T_c), formano uno stato elettronico esteso, che non è più soggetto ad alcuna resistenza elettrica.

Una versione semplificata della teoria BCS prevede che T_c dipenda da tre proprietà del materiale: il numero di elettroni che possono partecipare allo stato superconduttore (più è alto il numero e più alta è T_c); le frequenze caratteristiche del reticolo coinvolte nell'accoppiare gli elettroni nelle coppie di Cooper (maggiore la frequenza, più alta T_c); e la forza dell'accoppiamento tra le distorsioni del reticolo e gli elettroni (più forte è l'accoppiamento e più alta è T_c). Per decenni, la ricerca di valori più alti di T_c si è concentrata sull'ottimizzazione di queste tre proprietà, con una preferenza per il tentativo di migliorare le prime due. MgB_2 sembra avere una T_c alta per il suo più forte accoppiamento reticolo-elettroni, la terza proprietà.

LA RESISTENZA ELETTRICA di MgB_2 scende a zero quando il materiale viene raffreddato sotto la sua temperatura critica, pari a circa 40 kelvin. La temperatura critica è diversa per campioni prodotti con boro 10 o boro 11 puri. Questo chiaro spostamento isotopico è previsto dalla teoria BCS, e indica quindi che la superconduttività di MgB_2 è spiegabile con questo modello.

Lucy Reading-Ikkanda

de, chiaramente MgB_2 è un materiale promettente per magneti superconduttori che possano funzionare a temperature più alte e possibilmente immersi in campi ancora più intensi di quelli sopportabili dalla lega niobio-stagno, che oggi è il materiale preferito per le applicazioni.

La seconda proprietà superconduttrice di particolare interesse per la fisica applicata è la densità critica di corrente. Questa grandezza indica la massima quantità di corrente che un superconduttore può trasportare continuando ad avere resistenza nulla. Per densità di corrente superiori a quella critica, i vortici iniziano a spostarsi. E una volta che iniziano a muoversi si hanno perdite di energia. Ciò significa che il materiale ha una resistenza elettrica. Per contrastare questo effetto, i vortici devono essere bloccati introducendo nel superconduttore le giuste impurità. Spesso questa operazione può essere perfezionata rendendo più piccoli i singoli cristalliti (o grani) del materiale, ovvero migliorando l'area della superficie associata con i confini dei grani, dove i vortici sono fissati. Un altro modo per migliorare il fissaggio dei vortici implica l'aggiunta di microscopiche inclusioni di qualche altro materiale.

Al momento, una delle maggiori sfide associate alla produzione di magneti superconduttori in MgB_2 è quella di migliorare la densità critica di corrente in presenza di campi magnetici intensi. Questo parametro per MgB_2 puro è confrontabile con quello della lega niobio-stagno per piccoli campi magnetici, ma diminuisce molto più rapidamente all'aumentare della loro intensità. E questa non è una buona notizia. D'altra parte, nei quattro anni trascorsi dalla scoperta della superconduttività di questo composto, la comunità scientifica ha ottenuto notevoli miglioramenti della densità critica di corrente sia per i campi deboli sia per quelli intensi. E secondo coloro che si stanno dedicando a queste ricerche sono in vista altri miglioramenti.

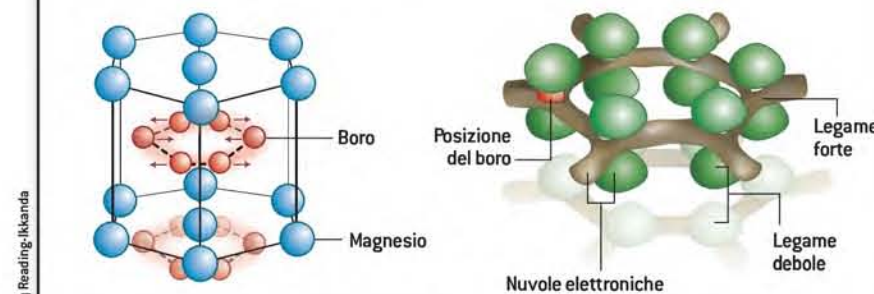
STRUTTURA E LEGAME

Una delle principali ragioni della temperatura di transizione sorprendentemente alta di MgB_2 è la forza dell'interazione tra certi elettroni e certe vibrazioni del reticolo. Un'interazione che si instaura per via della struttura e dei legami del materiale.

Gli atomi di boro di MgB_2 formano uno schema esagonale a nido d'ape (*in rosso, a sinistra*). Questi strati sono separati da strati di magnesio (*in blu*). Gli elettroni responsabili della conducibilità elettrica tradizionale, e anche della superconduttività, sono associati agli strati di boro e sono coinvolti in uno di due diversi tipi di legami nel materiale (*a destra*). Nel piano dell'esagono si ha un legame molto forte, mentre un legame più debole tiene insieme i diversi strati di boro.

Gli elettroni di conduzione dei legami planari sono fortemente influenzati dalle vibrazioni del reticolo nel piano (*freccia a destra*). Questa forte interazione, o accoppiamento, dà luogo a uno stato che rimane superconduttore anche a temperature più elevate.

MgB_2 ha riproposto una domanda di fisica di base molto interessante: può un superconduttore avere una superconduttività che coinvolga due collezioni distinte di elettroni (*in verde e oro*) che formino due diversi mari di coppie di Cooper? Gli esperimenti suggeriscono che questo è proprio il caso di MgB_2, che sarebbe il primo chiaro esempio di questo fenomeno.

Lucy Reading-Ikkanda

PER APPROFONDIRE

NAGAMATSU J. e altri, *Superconductivity at 39 K in Magnesium Diboride*, in «Nature», Vol. 410, pp. 63-64, 1° marzo 2001.

CANFIELD P.C. e BUD'KO S.L., *Magnesium Diboride: One Year On*, in «Physics World», Vol. 15, n. 1, pp. 29-34, gennaio 2002.

GRANT P.M., *Energy for the City of the Future*, in «Industrial Physicist», Vol. 8, n. 1, pp. 22-25, febbraio-marzo 2002. Disponibile su: www.aip.org/tip/INPHFA/vol-8/iss-1/p22.pdf.

CANFIELD P.C. e CRABTREE G.W., *Magnesium Diboride: Better Late than Never*, in «Physics Today», Vol. 56, n. 3, pp. 34-40, marzo 2003.

KWOK W., CRABTREE G.W., BUD'KO S.L. e CANFIELD P.C. (a cura), *Superconductivity in MgB_2: Electrons, Phonons and Vortices*, in «Physica C», Vol. 385, n. 1-2, marzo 2003.

Passato, presente e futuro

La scoperta della superconduttività di MgB_2 è al tempo stesso il frutto di decenni di ricerca mirata e un forte segnale che la natura non obbedisce sempre alle regole empiriche che elaboriamo nei nostri tentativi di descriverla. Sebbene si conoscesse l'esistenza di MgB_2 da mezzo secolo, non era mai stato messo alla prova per verificarne la superconduttività, anche perché non corrispondeva alla nostra idea di un potenziale superconduttore.

Negli ultimi quattro anni, la comprensione della superconduttività in questo composto si è evoluta rapidamente. Abbiamo un'idea chiara delle proprietà del materiale e stiamo imparando a modificarlo per migliorare l'intervallo di campi magnetici e di densità di corrente in cui può essere utilizzato. Le proprietà fra i 20 e i 30 kelvin sono migliorate drasticamente, tanto da far pensare che applicazioni come i magneti superconduttori possano funzionare raffreddandole con liquidi criogenici economici come l'idrogeno o il neon. Sono stati prodotti prototipi di cavi ricoperti e anche qualche magnete di prova, ma è necessario molto altro lavoro per ottimizzare le proprietà del superconduttore e per capire come si possano produrre materiali per ricoprire i cavi.

Nell'insieme, il futuro di MgB_2 sembra piuttosto roseo. In verità, se avverrà uno spostamento verso un'economia a base di idrogeno, allora MgB_2 potrebbe davvero imporsi. Se dovremo produrre grandi quantità di idrogeno, per esempio, in piccoli reattori a letto di ciottoli, allora dovremo anche trasportarlo in qualche modo. Un metodo potrebbe essere quello di trasportare l'idrogeno in forma liquida in tubi raffreddati sotto il suo punto di ebollizione, 20 kelvin. Questi stessi tubi potrebbero costituire il sistema criogenico per cavi di MgB_2 che condividono lo spazio all'interno dell'isolante termico. Oggi un simile sistema sembra più fantascienza che una realtà ingegneristica, ma è stato proposto per un serio studio di fattibilità.

Dopo la scoperta del primo superconduttore a base di ossido di rame, se ne sono scoperti molti altri. Invece a quattro anni dalla scoperta di MgB_2 non sono stati trovati altri composti simili. La scoperta della superconduttività negli ossidi era come la scoperta di un intero nuovo continente con vaste lande da esplorare. La scoperta della superconduttività di MgB_2, invece, sembra più simile alla scoperta di un'isola remota al largo di un arcipelago ben conosciuto. Chissà se è davvero l'ultimo elemento della catena, o se ci saranno ancora altre sorprese...